

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

# INGENIO

VOL.8 N°.1, 2025 - ISSN 2588-0829 / e-ISSN 2697-3243



INGENIERÍA, INNOVACIÓN E INVESTIGACIÓN

### Autoridades

Dr. Patricio Héctor Aurelio Espinosa del Pozo, Ph.D.  
*Rector de la Universidad Central del Ecuador*

### Consejo Editorial

Ing. Robert Enríquez Reyes, Ph.D., Editor en Jefe, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR  
Ing. Abel Remache Coyago, MSc., Editor Académico, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR  
Mgs. Tatiana Freire, Dipl., Editora de Sección, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR  
Mgs. Paulina Zary, Correctora de Estilo, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR  
Dr. Jhohannes Ritz, MA., MIB., Ph.D. (c), Miembro, EU Business School Munich, ALEMANIA  
Dra. Teresa Magal-Royo, Ph.D, Miembro, Universidad Politécnica de Valencia, ESPAÑA  
Dr. Andrés Vivas Albán, Ph.D., Miembro, Universidad del Cauca, COLOMBIA  
Dr. Boris Heredia Rojas, Ph.D., Miembro, Universidad del Norte, CHILE  
Dr. Jaime Duque Domingo, Ph.D., Miembro, Universidad de Valladolid, ESPAÑA  
Dr. Giovanni Herrera Enríquez, Ph.D., Miembro, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, ECUADOR  
Dr. José Luis Paz, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR  
Dr. Jesús López Villada, Ph.D., Miembro, Universidad Internacional SEK, ECUADOR  
Dr. Michel Vargas, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR  
Dr. Andrés Robalino-López, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR  
Dr. Kiyanoosh Golchin Rad, Miembro, Pukyong National University, SOUTH KOREA  
Dr. Ali Bagheri Fard, Miembro, George Brown College, CANADÁ  
Ing. Hamid Aadal, M.Sc., Miembro, Science & Technology Innovation-ADF, IRÁN  
Dra. Esther Campos Serrulla, Ph.D., Miembro, Universidad Europea de Madrid, ESPAÑA  
Dr. Alberto Sánchez, Ph.D., Miembro, Escuela de Ingenierías Industriales-UVA, ESPAÑA  
Dra. Diana Ayala, Ph.D., Miembro, Universidad de Santo Tomás, COLOMBIA  
M.Eng. Jaime Gómez García-Bermejo, Ph.D., Miembro, University of Valladolid, SPAIN  
Dra. Yolanda Vásquez Bernal, Miembro, Universidad Tecnológica de Panamá, PANAMÁ  
Dr. Majid Khorami, Miembro, Universidad Tecnológica Equinoccial-UTE, ECUADOR  
Dr. Diego Echeverría Jurado, Miembro, Operador Nacional de Electricidad - CENACE, ECUADOR

### Consejo Asesor y Evaluador

Ing. Nelson Laydra Quinteros, M.Sc., Escuela Politécnica del Litoral ESPOL, ECUADOR  
Dra. Silvana Gamboa Benitez, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR  
Ing. Fernando Jacome Sagñay, M.Sc, Universitario Rumiñahui ISTER, ECUADOR  
Ing. Peregrina Wong Wong, Ph.D, Universidad Politécnica Salesiana UPS, ECUADOR  
Ing. Johanna Cristina Jara, M.Sc., Universitario Rumiñahui ISTER, ECUADOR  
Ing. César Ayabaca Sarria, Ph.D, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR  
Ing. Jorge Medina Palacios, M.Sc, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ECUADOR  
Ing. Magali Cañarejo Antamba, Ph.D, Universidad Técnica del Norte UTN, ECUADOR  
Ing. Alexander Torres, M.Sc, Grupo de Investigación SMART-TECH, ECUADOR  
Ing. Jefferson Andrade Villarreal, M.Sc, Universidad Técnica del Norte UTN, ECUADOR  
Dra. Karla Gómez Bull, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez UACJ, MEXICO  
Dr. Jorge Bucheli García, Pontificia Universidad Católica del Ecuador PUCE, ECUADOR  
Dr. Jorge Albuja Sanchez, Pontificia Universidad Católica del Ecuador PUCE, ECUADOR  
Dra. Betzabeth Suquillo Ronquillo, Universidad Católica de Valparaíso PUCV, CHILE  
Dr. Gerardo González del Solar, Universidad Tecnológica Nacional-Mendoza UTN, ARGENTINA  
Ing. Cristina Torres Jacobowitz, M.Sc, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR  
Dra. Katty Coral Carrillo, Universidad Internacional SEK UISEK, ECUADOR  
Dra. Verónica Proaño Ríos, Universidad de Santiago de Chile USACH, CHILE  
Ing. Edwin Morales Díaz, Investigador Independiente, ECUADOR  
Dr. Carlos Luis Navas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador PUCE, ECUADOR  
Arq. Jorge Aguillón Robles M.D.B., Universidad Autónoma de San Luis Potosí UASLP, MEXICO  
Dr. Luis Ríos, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR  
Ing. Diego Sosa Caiza, Ph.D, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR  
Ing. Pablo Caiza Sánchez, Ph.D, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ECUADOR  
Ing. Carlos Ayala Mora, Ph.D, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR  
Ing. Atal Vivas Paspuel, M.Sc, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ECUADOR  
Ing. Johanna Medrano Barboza, Ph.D, Universidad Internacional SEK UISEK, ECUADOR  
Ing. Rogger Peña Coronel, M.Sc, Instituto Superior Tecnológico Simón Bolívar ISTSB, ECUADOR

Este número estuvo bajo la coordinación editorial de: Tatiana Freire

Revista Ingenio  
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec  
vicedecanat.fing@uce.edu.ec  
<http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/index>

Sitio web:  
<http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/index>  
Correo electrónico:  
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

ISSN impresa 2588-0829  
ISSN electrónica 2697-3243

Director | MSc. Edison Benavides  
Diagramación | Ing. Christian Echeverría  
Corrección de textos | Ing. Marcelo Acuña  
Portada | Katherine Cervantes, Ingeniería en Diseño Industrial,  
Universidad Central del Ecuador

Editorial Universitaria, 2024  
Ciudadela Universitaria, av. América, s. n.  
Quito, Ecuador  
+593 (02) 2524 033  
editorial@uce.edu.ec



Los contenidos pueden usarse libremente, sin fines comerciales y siempre y cuando se cite la fuente. Si se hacen cambios de cualquier tipo, debe guardarse el espíritu de libre acceso al contenido.

# ÍNDICE

## ARTÍCULO ORIGINAL

Sistema Web para la Dinamización de la Gestión de DNI en Entidades Gubernamentales Basado en SCRUM .....	5
<i>Castañeda C., Galvez E., Percy G., Santos J., Sánchez R.</i>	
Análisis del Modelo de Desgaste Lineal de Archard, una Vista Dinámica al Modelo Original .....	17
<i>Ortiz K., Vicente M.</i>	
Inteligencia Artificial: Machine Learning, para Detección Temprana de Plagas y Enfermedades de Cultivos Básicos, Nicaragua .....	24
<i>Urbina S., Bravo J.</i>	
Análisis Cuantitativo y Cualitativo de las Diferencias en la Incidencia de Lesiones por Accidentes de Trabajo en la Construcción: Un Estudio Comparativo entre las Provincias de Guayas y Pichincha en Ecuador, 2014-2023 .....	35
<i>Gómez-García A., Rivas F.</i>	
Estimación de La Resistencia a La Tracción en Suelos Reforzados con Fibras Sintéticas .....	43
<i>Briceño J., Barreto R., Guerrero Y.</i>	

## ARTÍCULO DE REVISIÓN

Métodos De Intervención Centrales Para Combatir Pérdidas Reales Y Aparentes De Agua En Sistemas De Distribución .....	52
<i>Rueda E., González B., Delgado M., Paredes D.</i>	
Evaluación de la Técnica de Algoritmos Genéticos para la Optimización Multi-Objetivo del Dimensionamiento de una Chimenea de Equilibrio Superior sección constante y su Ramal de Unión en un Aprovechamiento Hidroeléctrico .....	71
<i>Bravo G.</i>	

## ESTUDIO DE CASO

Sistemas SCADA, Aplicaciones en Plantas Potabilizadoras de Agua de la Costa Ecuatoriana, Caso Municipio del Cantón El Empalme .....	83
<i>Amaya C., Guerrero G., Laverde C., Andrade R.</i>	

Evaluación del Impacto de la Implementación de Techos Verdes en el Dimensionamiento de Sistemas de Alcantarillado Urbano .....	91
<i>Tapia B., Barros D., Soria M.</i>	
Comportamiento Sísmico y Propuesta de Reforzamiento de Edificios de Hormigón Armado Esquineros en Portoviejo, Ecuador .....	102
<i>Jiménez R., Cagua B.</i>	
Analysis of the Biodegradability Index of Organic Matter in the Water of the Machangara River in Quito City.....	119
<i>Rodríguez S., Rodríguez M., García S., Caina D.</i>	
Análisis de la Transición hacia la Movilidad Sostenible: Estrategias de Negocio para la Adopción Masiva de Vehículos Eléctricos en el Mercado Automotriz en la Ciudad de Guayaquil - Ecuador .....	128
<i>Salas R., Cárdenas D., Torres A.</i>	
Normas para publicar en la revista Ingenio .....	137

La Revista ingenio es el órgano de divulgación especializada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Central del Ecuador; su objetivo es la difusión de investigaciones técnicas y científicas en los campos de Ingeniería Civil, Ingeniería Informática/Sistemas de Información, Ingeniería en Diseño Industrial e Ingeniería en Computación Gráfica/Computación.

Es de periodicidad semestral y está dirigida a personas que estén inmersas tanto en el ámbito académico como industrial y a quienes les pueda interesar conocer de temas e investigaciones que se realizan dentro del ámbito de la revista.

La revista ingenio utiliza el Open Journal Systems (OJS) como sistema de gestión editorial, desarrollado por Public Knowledge Project (PKP). Todos los manuscritos a ser considerados para publicación deben ser enviados a través de este sistema.

Los artículos de la revista ingenio usan el sistema DOI el cual proporciona una infraestructura técnica y social para el registro y uso de identificadores interoperables persistentes, para su uso en redes digitales.

La revista INGENIO se encuentra indexada en:





## Sistema Web para la Dinamización de la Gestión de DNI en Entidades Gubernamentales Basado en SCRUM

### Web System for the Dynamization of ID Management in Government Entities Based on SCRUM

Christian Castañeda Rodríguez |  Universidad Nacional de Trujillo - UNT, La Libertad -PERÚ

Edisson Galvez Mori |  Universidad Nacional de Trujillo - UNT, La Libertad -PERÚ

Percy Olivarez Gerónimo Dionicio |  Universidad Nacional de Trujillo - UNT, La Libertad -PERÚ

Juan Pedro Santos Fernández |  Universidad Nacional de Trujillo - UNT, La Libertad -PERÚ

Robert Jerry Sánchez Ticona |  Universidad Nacional de Trujillo - UNT, La Libertad -PERÚ

Recibido: 22/3/2024

Recibido tras revisión: 17/4/2024

Aceptado: 3/7/2024

Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Gestión, documento nacional de identidad, entidades gubernamentales, metodología Scrum, sistema web.

#### KEY WORDS

Management, National identity document, Government entities, Scrum methodology, Web system .

#### RESUMEN

El presente documento describe el desarrollo de un sistema web para la gestión eficiente de documentos nacionales de identidad (DNI) en entidades gubernamentales. Nuestro sistema se centra en proporcionar un control eficaz sobre las solicitudes de DNI, abarcando las tres modalidades existentes: emisión por primera vez, duplicado y renovación. Estas se pueden hacer tanto de manera presencial como de manera virtual. Además, el sistema permite agendar citas para cualquier tipo de trámite y brindar al ciudadano el estado en el que se encuentra dicho trámite a través de la plataforma virtual. El desarrollo del sistema se realizó en tres etapas: Evaluación de Procesos, Diseño y Planificación del Proyecto, y Desarrollo y Validación del Proyecto. Esto se logró trabajando con base en la metodología SCRUM, que permite mejorar la planificación y el diseño del proyecto, gracias a su adaptabilidad y flexibilidad. Además, se incluyó los resultados de los indicadores económicos para este proyecto, con el fin de conocer la viabilidad económica y verificar que sí es beneficioso su implementación. También se realizaron las pruebas de rendimiento utilizando diversas herramientas tecnológicas como Apache, JMeter para pruebas de cargas y de estrés, obteniendo como resultados que el sistema acepta un promedio de 750 usuarios concurrentes. Estas pruebas aseguraron un sistema robusto, eficiente que proporciona una experiencia de usuario confiable y satisfactoria. El sistema propone una solución íntegra para enriquecer la experiencia de los usuarios, incluyendo tanto a los empleados como a los ciudadanos. Este sistema acelera el proceso de manejo de documentos de identidad y ayuda a reducir significativamente el tiempo de espera para los ciudadanos al hacer sus trámites de manera virtual, lo que representa una oportunidad para actualizar los procedimientos en las instituciones gubernamentales.

#### ABSTRACT

This document describes the development of a web system for the efficient management of National Identity Documents (DNI) in government entities. Our system focuses on providing effective control over DNI applications, covering the three existing modalities: issuance for the first time, duplicate and renewal. These can be done both in person and virtually. In addition, the system allows you to schedule appointments for any type of procedure and provide the citizen with the status of said procedure through the virtual platform. The development of the system was carried out in three stages: Process Evaluation, Project Design and Planning, and Project Development and Validation. This was achieved by working based on the SCRUM methodology that allows improving project planning and design, thanks to its adaptability and flexibility. In addition, the results of the economic indicators for this project were included in order to know the economic viability and verify whether its implementation is beneficial. Performance tests were also carried out using various technological tools such as Apache, JMeter for load and stress tests, obtaining the results that the system accepts an average of 750 concurrent users. These tests ensured a robust, efficient system that provides a reliable and satisfactory user experience. The system proposes a comprehensive solution to enrich the user experience, including both employees and citizens. This system accelerates the process of handling identity documents and helps to significantly reduce waiting time for citizens by completing their procedures virtually, which represents an opportunity to update procedures in government institutions..

## I. INTRODUCCIÓN

En el marco de una creciente necesidad de eficiencia en la gestión de documentos nacionales de identidad (DNI), presentamos este artículo que detalla la implementación de un sistema web que trata de mejorar la gestión de documentos, de tal manera que sea innovador, adaptable y entendible fácilmente para los usuarios. Entre los procesos principales asociados con la solicitud de DNI se tiene el agendamiento de citas, atención de solicitudes y consulta de trámites. Este sistema se posiciona como una solución integral centrada en mejorar la experiencia del ciudadano, agilizar el proceso de gestión y fortalecer la seguridad en la administración de datos sensibles. No se han encontrado investigaciones de sistemas de información de gestión de DNI, excepto la investigación realizada por [1], la cual consiste en una solución de inteligencia de negocios para controlar los procesos de generación y emisión del DNI en el RENIEC (Registro Nacional de Identificación y Estado Civil).

### 1.1. GESTIÓN DE IDENTIDAD

La gestión de documentos nacionales de identidad es un término muy utilizado en la práctica y en la academia, pero aún carece de significado definitivo por su novedad conceptual y disciplinaria. Según [2], este término está relacionado con los procedimientos en situaciones digitales emergentes hasta la fecha. Sin embargo, las ideas actuales sobre la gestión de solicitudes de DNI no capturan ni se relacionan con el papel específico que desempeña el Gobierno en nuestra sociedad.

Actualmente, el uso de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) es esencial en la identificación de ciudadanos ya que se hace uso de una base de datos con grandes capacidades. En numerosos países de América Latina, el procedimiento de registro concluye con la emisión del Documento de Identidad (DNI), el cual incorpora datos personales cruciales, como la fotografía, firma, huella digital, nombres, apellidos, fecha de nacimiento, sexo y estado civil. Conforme a [3], el DNI es fundamental en la vida de los ciudadanos, y su eficiente gestión es esencial para garantizar la seguridad y facilitar el acceso a servicios gubernamentales, tanto de manera presencial como remota.

### 1.2. PROCESOS DE GESTIÓN DE DNI DE FORMA MANUAL Y SU PROBLEMÁTICA

La gestión manual de documentos de identidad (DNI) implica llevar un registro físico en un lugar específico, utilizando métodos tradicionales como hojas de cálculo o incluso libros de registro validados por la entidad gubernamental. De acuerdo con [4], esta práctica destaca la necesidad imperante de una solución tecnológica que automatice estos procedimientos, reduciendo los tiempos de

trabajo en el personal, garantizando un control eficiente del personal autorizado y facilitando la generación de informes actualizados.

Aunque algunas entidades gubernamentales aún gestionan los DNI manualmente, existe la oportunidad de modernizar estos procesos mediante la implementación de tecnologías más avanzadas como son los sistemas web. Según las palabras de [4], esta transición podría conllevar a una gestión más eficiente y de mayor calidad de los documentos de identidad.

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema web basado en SCRUM para gestionar eficientemente los documentos de identidad (DNI). La herramienta permite solicitar DNI azules de 3 modalidades: por primera vez, por duplicado y por renovación, además también incluye agendar citas presenciales, y consultar el estado de trámites.

El objetivo principal es reducir los tiempos de procesos y mejorar el control de las solicitudes de DNI en entidades gubernamentales encargadas de la gestión.

## 2. MATERIALES

El presente software se creó utilizando una serie de tecnologías fundamentales, en las cuales se tiene como principales:

**Laravel 9.52** es un marco de trabajo de aplicaciones web basado en PHP que proporciona una buena estructura para tu aplicación [5].

**PHP 8.0.30** es un lenguaje de programación versátil que se utiliza para crear aplicaciones web dinámicas y se integra fácilmente con el código HTML de las páginas web [6].

**MySQL 8.0.30** es un gestor que permite crear y administrar bases de datos relacionales mediante consultas SQL [7].

**Tailwind CSS 1.9** es un framework de CSS que te permite diseñar y construir páginas web en tu marcado HTML [8].

**Nodejs 18v** permite ejecutar código JavaScript fuera de un navegador web y proporciona una plataforma para desarrollar aplicaciones [9].

**Bootstrap 5.3.2** es un framework de CSS para construir páginas web responsivas de manera rápida y sencilla [10].

**Dompdf 2.0.1** es una extensión para Laravel que genera y construye PDF a partir de código HTML [11].

**Laravel Breeze 1.19.2** es un paquete que proporciona una estructura básica de autenticación para Laravel, incluyendo inicio de sesión, registro y verificación por correo electrónico [12].

### 2.1. METODOLOGÍA

Este artículo se desarrolla en torno a tres etapas cruciales: Evaluación de procesos, Diseño y planificación del proyecto y, finalmente, Desarrollo y validación del proyecto.

### 2.1.1. Evaluación de Procesos

En la etapa inicial, se lleva a cabo una investigación meticulosa para identificar y comprender los procesos relevantes para la gestión de DNI en entidades gubernamentales. Esta fase es fundamental para establecer las necesidades específicas y los desafíos que el sistema web debe abordar.

### 2.1.2. Diseño y planificación del proyecto

La segunda fase se concentra en planificar las tareas que se trabajarán con base en los requerimientos, estableciendo tiempos para cada uno y además en el diseño de nuestro proyecto empleando la metodología SCRUM para asegurar un proceso ágil y adaptable.

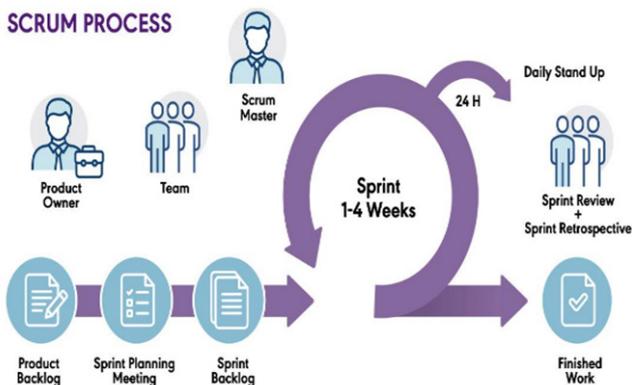
Siguiendo la opinión de [13], SCRUM es una metodología eficiente para trabajar proyectos de desarrollo web ya que tiene un enfoque ágil y versátil cuyo principal objetivo es maximizar el retorno de la inversión para la organización. Su enfoque se centra en desarrollar primero las funcionalidades con mayor prioridad para los usuarios estableciendo tiempos fijos para culminarlo, que por lo general es de 2 semanas.

En consonancia con [14], se optó por esta metodología como marco de trabajo debido a su capacidad para manejar los requisitos de manera más adaptable, flexible ante los cambios y se apoya en el aprendizaje continuo durante el proceso, lo que hace que el ciclo de vida interactivo incremental sea ideal para este marco.

De acuerdo con lo expresado por [15], para continuar con esta metodología se identificó tres roles principales: el propietario del producto, el maestro Scrum y el equipo de desarrollo, también se organizó considerando el producto backlog, sprint backlog y realizando el sprint planning, daily y el sprint review para mantener el proceso correcto que establece la metodología (ver Figura 1).

**Figura 1.**

Procesos de la metodología SCRUM



### 2.1.3. Validación del proyecto

La etapa final comprende la construcción del sistema web y la realización de pruebas rigurosas. Esta fase es

esencial para garantizar que el sistema web no solo cumple con los requisitos definidos en las etapas anteriores, sino que también es robusto, seguro y eficiente. Las pruebas permiten identificar y corregir cualquier problema antes de la implementación, asegurando que el sistema web pueda manejar eficazmente la gestión de DNI. Algunas historias de usuario se dividieron en tareas más simples con sus criterios de terminación para simplificar el trabajo. El criterio de selección de las herramientas para las pruebas del sistema se optó por Jmeter por ser un software libre debido a que RENIEC es una dependencia del Estado y cuenta con escasos recursos económicos y los detalles técnicos de los equipos utilizados se muestran en la Figura 3.

## 3. RESULTADOS

### 3.1.1. PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN

Como se puede observar en la Tabla 1, se designó un encargado para cada función, dando lugar a la creación del equipo SCRUM. Este equipo se compone del propietario del producto, el Scrum master y el equipo de desarrollo, el cual está integrado por tres desarrolladores.

**Tabla 1.**

Roles SCRUM

Responsables	Rol
Christian Castañeda	Propietario de Producto
Edisson Gálvez	Scrum Máster
Percy Gerónimo Christian Castañeda Edisson Gálvez	Equipo desarrollador

Luego, se recopiló información sobre los procesos, se identificó las necesidades específicas de cada usuario o encargado de la gestión del DNI, detallando el propósito de cada necesidad. Posteriormente, estas necesidades se priorizaron utilizando historias de usuarios, que se registraron en la tabla del registro de productos (product backlog) priorizado. Además, estas necesidades se organizaron en tres sprints, proporcionando una estructura clara y eficiente para la implementación del proyecto.

### 3.1.2. PRODUCT BACKLOG PRIORIZADO

La priorización del backlog del producto es crucial para enfocar los esfuerzos del equipo en las funcionalidades más importantes y de mayor valor para el proyecto. Se presentan las funcionalidades a implementar organizadas

**Tabla 2.**

Backlog priorizado por cada sprint

Historia	Descripción	Prioridad	Tiempo (días)	Nº Sprint
HU1	Iniciar sesión como registrador	1	1	Sprint 1
HU2	Iniciar sesión como Mesa de partes	1	1	
HU3	Gestionar una solicitud de DNI por primera vez	1	2	
HU4	Gestionar el registro de DNI por primera vez	1	2	
HU5	Generar DNI por primera vez	1	2	
HU6	Solicitar DNI duplicado de manera virtual	2	2	Sprint 2
HU7	Gestionar una solicitud de DNI por duplicado	2	2	
HU8	Gestionar el registro de DNI por duplicado	2	2	
HU9	Generar DNI por duplicado	2	2	
HU10	Solicitar DNI por renovación de manera virtual	3	2	
HU11	Gestionar las solicitudes de DNI por renovación	3	3	Sprint 3
HU12	Gestionar el registro de DNI por renovación	3	3	
HU13	Generar DNI por renovación	3	2	
HU14	Consultar el estado de solicitud de DNI	3	2	
HU15	Buscar registro por nombre de titular	3	1	
HU16	Buscar solicitud por nombre de titular	3	1	
HU17	Plan de pruebas	3	1	
TIEMPO ESTIMADO (TIME BOXING)		31		

para 3 Sprints, para la priorización se tuvo en cuenta fundamentalmente la dependencia de procesos (ver Tabla 2).

### 3.1.3. INDICADORES ECONÓMICOS

Además, se llevó a cabo un análisis de indicadores económicos para este subsistema, con el objetivo de determinar su rentabilidad. Este análisis permitió obtener una serie de resultados basados en diferentes indicadores, proporcionando una visión clara del potencial económico y la viabilidad financiera de nuestro sistema de gestión de DNI (ver Tabla 3).

**Tabla 3.**

Indicadores económicos

Indicador económico	Valor obtenido	Condición	Estado
VAN	S/ 3 368,11	VAN>0	Aprobado
TIR	27%	TIR>18%	Aprobado
B/C	1,09	B/C>1	Aprobado

Por lo tanto, con base en estos indicadores se puede afirmar que el sistema de gestión de DNI es económicamente viable, debido a que los indicadores de evaluación económico lo comprueban.

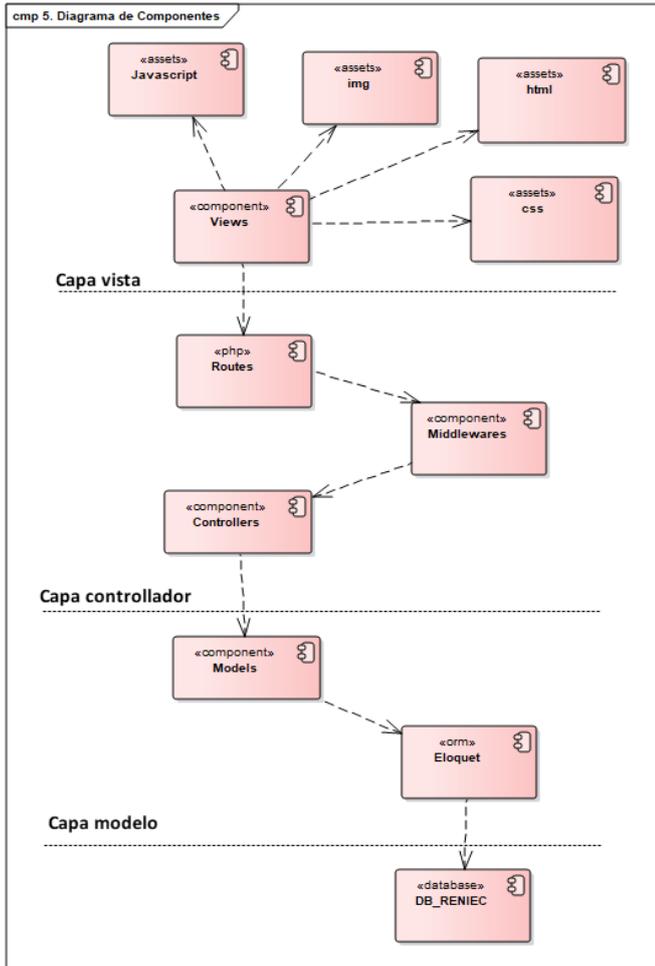
### 3.1.4. DIAGRAMA DE COMPONENTES

Esta representación gráfica ofrece una panorámica de cómo están organizados y cómo interactúan los componentes clave del software en el sistema. Estos componentes representan diversas partes del sistema que desempeñan funciones específicas vinculadas a la gestión de DNI. Las flechas señalan las interacciones entre estos componentes para ejecutar las funciones del sistema (ver Figura 2).

### 3.1.5. DIAGRAMA DE DESPLIEGUE

Este esquema ilustra la forma en que el sistema se despliega en la infraestructura de hardware y software, resaltando la distribución de los componentes del sistema en diversos servidores y su intercomunicación. En nuestro esquema, se aprecia la incorporación de elementos de red, tales como switches y routers, que facilitan la trans-

**Figura 2.**  
Diagrama de componentes.



misión eficiente de datos entre los distintos componentes del sistema (ver Figura 3). Adicionalmente, se muestra cómo el sistema se implementa en servidores y cómo se accede a él a través de PCs de escritorio.

También se destaca la integración de impresoras, que permiten la generación de documentos físicos a partir de los datos gestionados por el sistema.

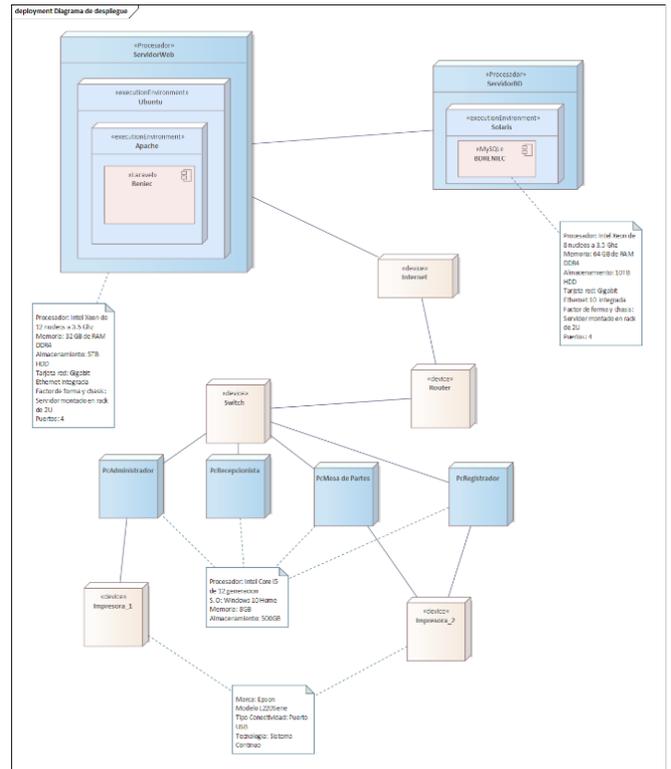
### 3.1.6. DISEÑO DEL SISTEMA

Las historias de usuario que son módulos del sistema, se representan de forma integrada para una mejor visualización mediante un diagrama de casos de uso (ver Figura 4). Este diagrama resalta de manera evidente los actores encargados de llevar a cabo las nuevas funciones modulares implementadas.

### 3.1.7. MODELO DE BASE DE DATOS

Un aspecto esencial es el modelo físico de la base de datos, ya que es crucial por su capacidad para ofrecer una representación visual detallada de la configuración del sistema y las relaciones entre las tablas (ver Figura 5).

**Figura 3.**  
Diagrama de despliegue.



### 3.1.8. PRUEBAS DE RENDIMIENTO

Se realizaron pruebas del sistema de información basadas en la web utilizando el software JMeter para realizar pruebas de carga y estrés, centrándose en la base de datos. Durante esta cantidad de pruebas realizadas, se sometió la base de datos a una carga simultánea de 750 hilos (usuarios) obtenidos por ensayo y error, a partir de 751 hilos se tuvo un error de 0,4% de error, como se visualiza en la Figura 6.

Estas pruebas se detallan de manera exhaustiva en el árbol de resultados (ver Figura 7) y en la gráfica de resultados (ver Figura 8).

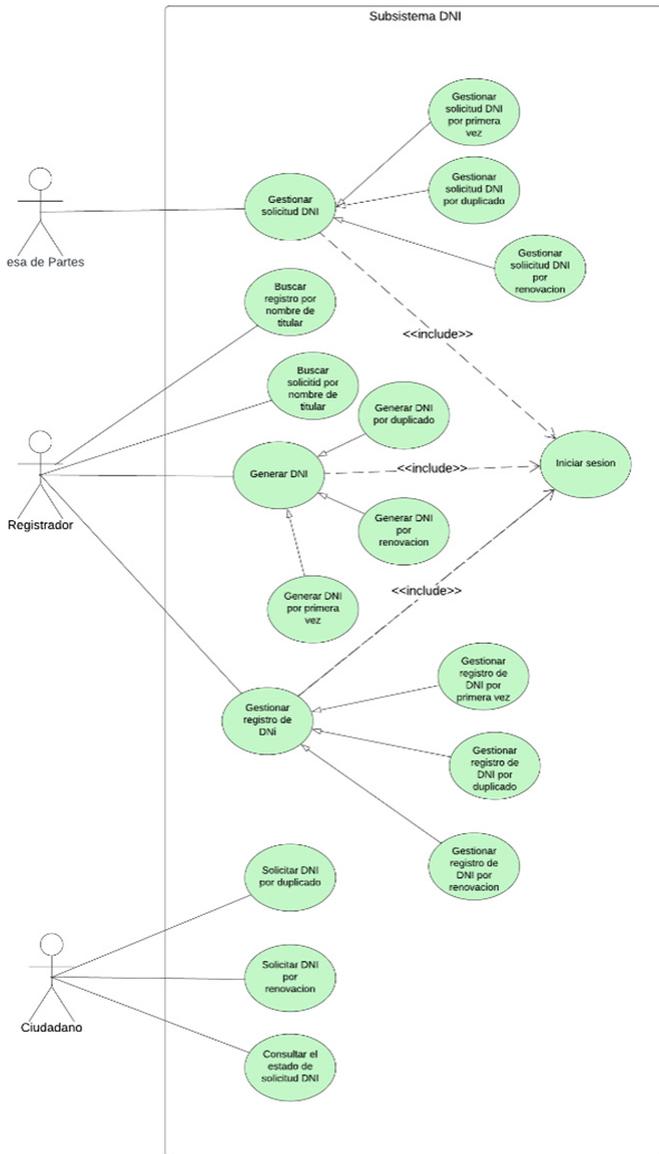
En la solicitud en cuestión, se observa que el tiempo total de procesamiento fue de 105 milisegundos. Además, el tiempo requerido para establecer una conexión con el servidor fue de 103 milisegundos. La latencia, es decir, el tiempo hasta recibir la primera pieza de información tras enviar la solicitud, también fue de 105 milisegundos.

En esta prueba de rendimiento con 750 usuarios concurrentes, se identificó una variabilidad significativa en los tiempos de respuesta, reflejada en una desviación de 38. El tiempo promedio de respuesta de las solicitudes fue de 55 milisegundos, con una mediana de 57 milisegundos, lo que indica que la mitad de las solicitudes se procesaron en menos tiempo y la otra mitad en más.

Además, el sistema demostró un rendimiento robusto, siendo capaz de manejar más de 50 mil solicitudes por minuto, con lo cual podemos afirmar que estos resultados

Figura 4.

Diagrama de casos de uso.



evidencian la eficiencia de nuestro sistema en condiciones de alta demanda.

3.1.9. PANTALLAS DE MÓDULOS PRINCIPALES

Nuestro sistema comienza con un Inicio de sesión para que puedan ingresar al sistema solo las personas autorizadas con sus credenciales (ver Figura 9).

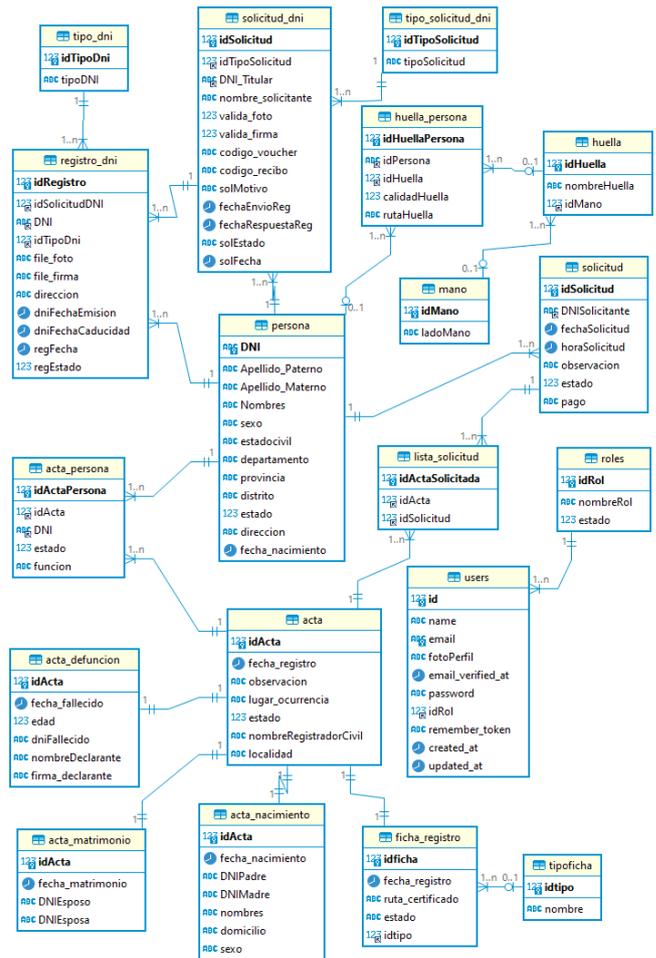
Se tiene el módulo de gestión de solicitudes de DNI azul por primera vez para personas que están cumpliendo los 17 años y más, se presenta la interfaz de nueva solicitud (ver Figura 10).

En el módulo de gestión de solicitudes incluye la lista de solicitudes con los datos más relevantes de cada solicitud de un DNI (ver Figura 11).

Por otra parte, el usuario registrado como registrador tendrá la tarea hacer la revisión de las solicitudes y aceptarlos si es válido mediante un registro de DNI azul por

Figura 5.

Diagrama físico de base de datos.



primera vez donde incluye subir la foto y la firma del ciudadano solicitante (ver Figura 12).

Además, también podrá tener el control de todos los registros por medio de un mantenedor de registros de DNI azul (ver Figura 13).

Se agregó la funcionalidad de generar un DNI en base a los datos de la persona registrada en formato PDF, tanto el lado anverso (ver Figura 14). como reverso (ver Figura 15).

Se plantearon consultas para verificar el estado de avance de los tramites de DNI que puede realizar el sistema, esto con el fin de que el usuario tenga idea del avance de su trámite (ver Figura 16).

También se tiene la opción de solicitar DNI de manera remota para el caso de DNI duplicado y renovados lo cual se inicia validando la identidad por número de DNI y por datos de su lugar de nacimiento y fecha de nacimiento (ver Figura 17).

Además, incluimos el requerimiento de reservar una cita para realizar cualquier tipo de trámite incluyendo las solicitudes de recojo de DNI (ver Figura 18).

En la etapa del sprint retrospective de cada sprint ejecutado se alineó con las tareas planificadas, los plazos

establecidos y los criterios de finalización definidos al comienzo de cada sprint. Esta progresión es evidente en el gráfico de Burndown del sprint 1 mostrado en la Figura 19.

Respecto al impedimento backlog se tuvo el problema de algunas historias de usuarios que tuvieron narrativas insuficientemente preparadas o dependencias no identificadas o sin resolver. En lo referente al incidente backlog se tuvieron algunos problemas de rutina detectados a nivel de tarea, como por ejemplo al gestionar avisos salió un nuevo error, porque no se estuvo validando el tipo del archivo generado.

### 3.1. DISCUSIONES

Es claro, según las fuentes proporcionadas, que la gestión de documentos de identidad y el registro civil son aspectos críticos de los servicios gubernamentales en diversas regiones. Cada fuente destaca diferentes desafíos y soluciones relacionadas con sistemas de información de este ámbito.

Según [16], señala la falta de consistencia y precisión en las direcciones físicas en los documentos de identidad de la República de Angola, lo que afecta la entrega eficiente de servicios gubernamentales. El marco sugerido para los sistemas de información busca elevar la calidad de los datos y la exactitud de las identificaciones emitidas, mediante el uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esto se alinea con la noción generalizada de que la tecnología puede desempeñar un papel crucial en la mejora de la fiabilidad de los sistemas de identificación.

Conforme a [17], se examina la implementación de un Sistema de Información de Administración de Población en la Ciudad de Kendari, haciendo hincapié en la importancia de la comunicación efectiva, la gestión de recursos y las actitudes del personal para lograr una implementación exitosa de políticas. Aunque el sistema muestra ser eficaz en ciertos aspectos, el estudio identifica desafíos persistentes, especialmente en el registro de población, debido a deficiencias en las instalaciones. Esto subraya la necesidad de considerar no solo los aspectos tecnológicos, sino también la infraestructura de soporte y los factores humanos en las implementaciones de sistemas.

Siguiendo lo expuesto por [18], destaca la importancia de la tecnología que respalda al Departamento de Población y Registro Civil de la Ciudad de Magelang, destacando la importancia de la confianza, la eficiencia y la efectividad para el uso continuo del Sistema de Información de Gestión de Admisiones de Solicitudes de Administración de Población (SIMP3AK). Esto enfatiza la necesidad de sistemas confiables que no solo cumplan con los requisitos técnicos, sino que también contribuyan a la eficacia general y la satisfacción de los usuarios.

Conforme a lo expuesto por [19], aborda los desafíos en la recopilación de datos de población y afirman que el objetivo del estudio es describir la implementación del Sistema de Información de Administración de Población en la Gestión de Tarjetas de Identidad (KTP) en el Departamento de Población y Registro Civil del Regency de Sleman, resaltando la importancia de un sistema de información bien estructurado para una gestión eficiente de la base de datos.

De acuerdo con [20], cambia el enfoque a los desafíos de seguridad enfrentados por los sistemas de registro civil a nivel mundial en la era digital. El documento identifica amenazas cibernéticas, robo de identidad y preocupaciones de privacidad como desafíos principales y sugiere estrategias como medidas robustas de ciberseguridad, mecanismos de verificación de identidad y regulaciones de protección de datos. Esto destaca la necesidad de un enfoque integral para abordar no solo la funcionalidad, sino también los aspectos de seguridad de los sistemas de información.

En síntesis, un tema recurrente en estas fuentes es el reconocimiento de los sistemas de información como herramientas esenciales para la gestión de documentos de identidad y registros civiles. A pesar de las oportunidades de mejora que ofrecen los avances tecnológicos, abordar los desafíos implica adoptar un enfoque holístico que considere la infraestructura, los aspectos humanos y las preocupaciones de seguridad.

### 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de un sistema web para administrar eficazmente los documentos nacionales de identidad (DNI) en instituciones gubernamentales es fundamental en un entorno cada vez más digitalizado.

La metodología SCRUM fue muy útil y pertinente para lograr con éxito el desarrollo de este sistema, permitió planificar y diseñar el proyecto de manera ágil y adaptable, centrándose en las necesidades específicas de los usuarios y priorizando las funcionalidades más importantes.

La viabilidad económica del sistema fue positiva en cada uno de sus indicadores, debido a lo cual se afirma que este proyecto sería muy beneficioso económicamente para las entidades gubernamentales encargadas de este proceso.

Las pruebas de rendimiento fueron satisfactorias en cuanto a las pruebas de carga y de estrés, del cual afirmamos que el proyecto es apto para un promedio de 750 usuarios concurrentes como máximo que utilizarían el sistema, ya que el sistema demostró la capacidad de manejar más de 50 mil solicitudes por minuto.

Además, se diseñaron diversas interfaces con el objetivo de proporcionar a cada usuario una experiencia

agradable, fluida, sencilla y además restringe los roles para cada usuario con sus credenciales. Esto permitirá que los usuarios puedan interactuar y familiarizarse con el sistema de manera intuitiva.

Para el caso investigaciones futuras, se recomienda explorar tecnologías emergentes en el campo de la gestión de identidad, como inteligencia artificial, el blockchain o la biometría, para mejorar aún más la eficiencia y seguridad de los sistemas de gestión de DNI.

Finalmente, se puede concluir que el sistema propuesto dinamiza la gestión de identidad de una manera eficiente ya que se corrobora con todos los resultados presentados. Este sistema representa una oportunidad para modernizar los procesos de gestión de documentos de identidad en entidades gubernamentales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Joao, *Análisis, diseño e implementación una solución de inteligencia de negocios orientada a controlar los procesos de generación y emisión del DNI (Documento Nacional de Identidad) en el RENIEC (Registro Nacional de Identificación y Estado Civil)*, Repositorio de Tesis PUCP, 2014.
- [2] A. Itojong Anthony y E. Okonette, «National Identity Management in Nigeria: Policy Dimensions and Implementation», *International Journal of Humanities & Social Science Studies (IJHSSS)*, vol. 3, n.º 1, pp. 279-287, 2016.
- [3] M. Mamdouh, A. Ismail Awad, A. A. M. Khalaf y H. F. A. Hamed, «Authentication and Identity Management of IoT Devices: Achievements, Challenges, and Future Directions», *Computers & Security*, vol. 111, pp. 1-24, 2021.
- [4] F. O. Oliha y P. O. Iyoha, «An Investigation of Selected Identity Management Agencies Towards a Unified», *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 24, n.º 1, pp. 27-39, 2023.
- [5] Laravel, «Meet Laravel», [En línea]. Available: <https://laravel.com/docs/10.x#meet-laravel>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [6] PHP, «¿Qué es PHP?», [En línea]. Available: <https://www.php.net/manual/es/intro-what-is.php>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [7] Google Cloud, «¿Qué es MySQL?», [En línea]. Available: <https://cloud.google.com/mysql?hl=es>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [8] Kinsta, «¿Qué es Tailwind CSS?», [En línea]. Available: <https://kinsta.com/es/blog/tailwind-css/#qu-es-tailwind-css>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [9] J. Lucas, «¿Qué es NodeJS y para qué sirve?», OpenWebinars, 4 9 2019. [En línea]. Available: <https://openwebinars.net/blog/que-es-nodejs/>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [10] Santander Universidades, «¿Qué es Bootstrap y cómo funciona este framework?», Santander Open Academy, 26 6 2023. [En línea]. Available: <https://www.santanderopenacademy.com/es/blog/que-es-bootstrap.html>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [11] M. Ángel Álvarez, «Generar PDF en Laravel con DomPDF», Desarrollo Web, 2 11 2020. [En línea]. Available: <https://desarrolloweb.com/articulos/generar-pdf-laravel-dompdf.html>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [12] aprodilles, «Autenticación en Laravel con Breeze», Kinsta, 8 6 2023. [En línea]. Available: <https://kinsta.com/es/blog/laravel-breeze/>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [13] Proyectos Agiles, «¿Qué es SCRUM?», Proyectos Agiles, [En línea]. Available: <https://proyectosagiles.org/que-es-scrum/>. [Último acceso: 24 1 2024].
- [14] M. V. Estrada Velasco, P. R. Saltos Chávez, J. A. Núñez Villacís y W. C. Cunuhay Cuchiye, «Revisión Sistemática de la Metodología Scrum para el Desarrollo de Software», *Dominio de las Ciencias*, vol. 7, n.º 4, pp. 434-447, 2021.
- [15] O. Monye y L. De Koker, «Strengthening financial integrity in Nigeria: the national in Nigeria: the national identification harmonization project», *Journal of Financial Crime*, vol. 29, n.º 4, pp. 1137-1154, 2022.
- [16] M. Mutudi y T. Iyamu, «An information systems framework to improve the issuance of identity documents through enhanced data quality in the Republic of Angola», *The electronic journal of information systems in developing countries*, vol. 86, 2020.
- [17] K. Kendari, «Implementasi sistem informasi administrasi kependudukan dalam pelayanan kartu tanda penduduk pada dinas kependudukan dan catatan sipil kota Kendari», *Journal Publicuho*, vol. 3, n.º 2, pp. 233-246, 2020.
- [18] G. F. Ariesta Susilo y P. Afandi, «Continuance use of management information systems for civil registration services», *Jurnal Riset Akuntansi Kontemporer*, vol. 13, n.º 1, pp. 37-41, 2021.
- [19] N. Latifah y A. Firdonsyah, «Population Data Management Information System of Population and Civil Registration Department», *Procedia of Engineering and Life Science*, vol. 1, n.º 2, pp. 1-8, 2021.
- [20] P. Kennedy Okoth, «Security challenges in civil registration: safeguarding vital information in an evolving landscape», *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 19, n.º 1, pp. 1051-1071, 2023.
- [21] G. Casiño y K. Casiño, «Web-Based Student Identification Card System: An Alternative for School On-site Processing», *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 7, n.º 8, pp. 234-239, 2022.

[22] Estado Peruano, «¿Qué es el Documento Nacional de Identidad (DNI)?», Estado Peruano, 14 1 2024. [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/235-que-es-el-documento-nacional-de-identidad-dni>. [Último acceso: 24 1 2024].

[23] F. Idrizi, B. Nebi, A. Memeti, F. Imeri y S. Luma-Osmami, «Identity document electronic management system», *Journal of Natural Sciences and Mathematics of UT*, vol. 7, n.º 13-14, pp. 65-76, 2022.

[24] J. Sedlmeir, R. Smethurst, A. Rieger y G. Fridgen, Digital Identities and Verifiable Credentials», *Business & Information Systems Engineering*, vol. 63, n.º 5, pp. 603-613, 2021.

[25] G. Wirosasmito y R. Ratono, «WebGIS Development to Integrate, Visualize, Map, and Disseminate Population Data», *2023 International Conference on Computer Science, Information Technology and Engineering (ICCoSITE)*, pp. 784-789, 2023.

[26] D. Recordon y R. Reed, «OpenID 2.0: a platform for user-centric identity management», *Proceedings of the second ACM workshop on Digital identity management*, pp. 11-16, 2006.

[27] J. D. Chávez Yrigoyen, «Análisis, diseño e implementación una solución de inteligencia de negocios orientada a controlar los procesos de generación y emisión del DNI (Documento Nacional de Identidad) en el RENIEC (Registro Nacional de Identificación y Estado Civil)», Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2014.

ANEXOS

Figura 6. Gráfico de resultados de las pruebas.

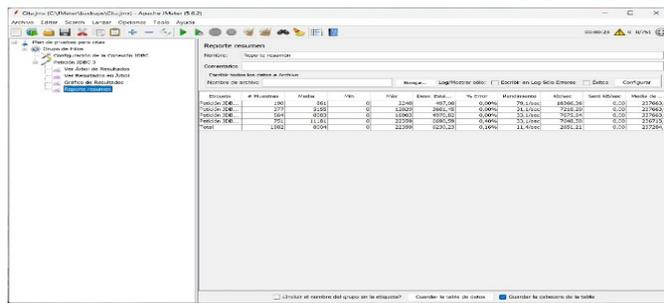


Figura 7. Árbol de resultados.

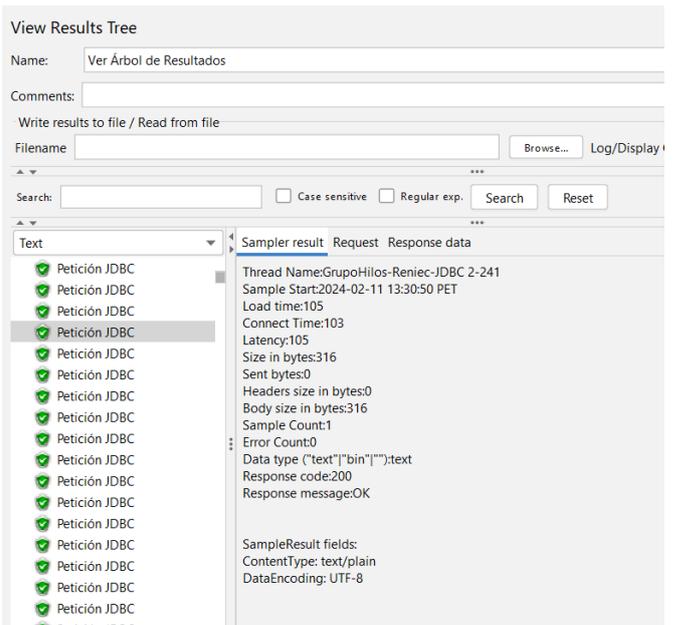
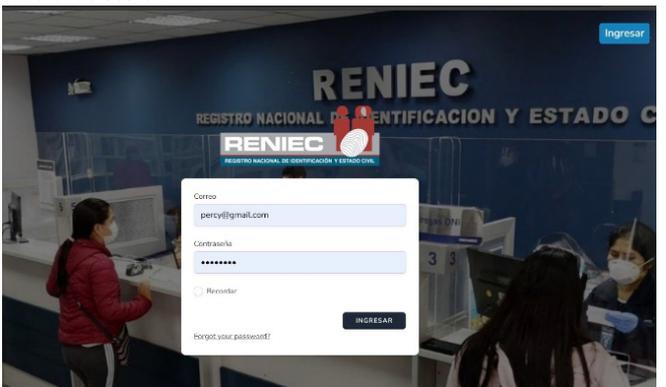


Figura 8. Gráfico de resultados.



Figura 9. Inicio de sesión



**Figura 10.**  
Nueva solicitud de DNI.

**Figura 12.**  
Nuevo registro de DNI azul.

**Figura 11.**  
Listar solicitudes de DNI.

Código	Solicitante	DNI	Contacto	Motivo	N° Voucher	Fecha Recepcion	Estado	Opciones
2	Juanita Carmen	22222210	985714236	Por cumplir los 17 años de edad	1245	2024-04-24 01:53:57	Completado	Ver Det.
3	Jose Miguel	22222221	985714236	Por cumplir los 17 años de edad	1245	2024-04-24 02:01:10	Pendiente	Ver Det.

**Figura 13.**  
Listar registros de solicitudes de DNI.

Código	Nombres	Apellidos	Fecha de Registro	Estado	Opciones
2	Juanita Carmen	Torres Morales	2024-04-24 02:08:21	Completado	Modificar Genera Det.
3	Jose Miguel	Rojas Vargas	2024-04-24 02:11:26	Completado	Modificar Genera Det.

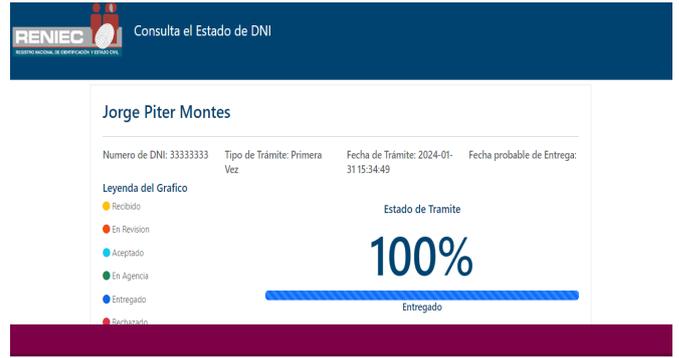
**Figura 14.**  
DNI anverso.



**Figura 15.**  
DNI reverso.



**Figura 16**  
Consulta estado de trámite de DNI.



**Figura 17.**  
Validar identidad para solicitudes virtuales.

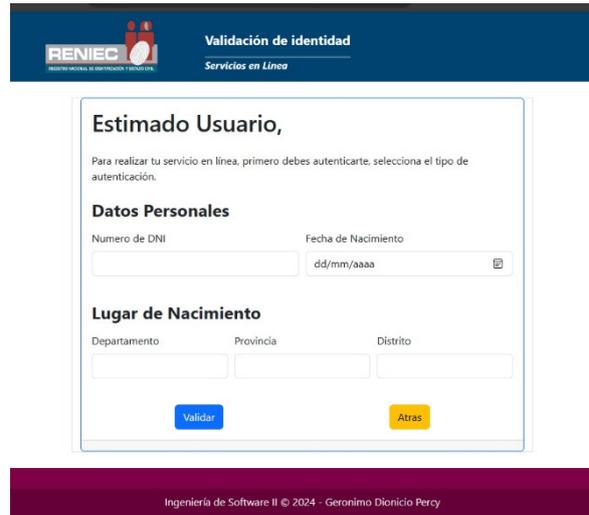
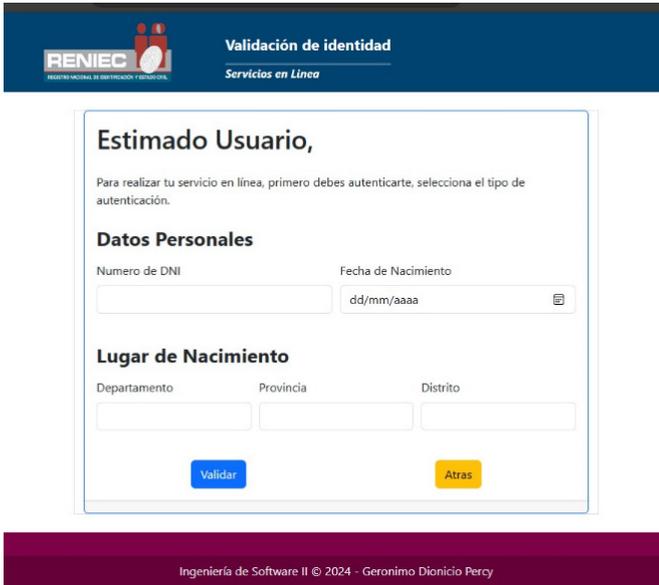


Figura 18.  
Reserva de citas.

## Reserva de cita

### Datos personales

DNI Ingrese se número de DNI

Continuar

### Validación de primer apellido

Primer... El apellido ingresado debe ser i

Regresar
Continuar

### Datos del solicitante

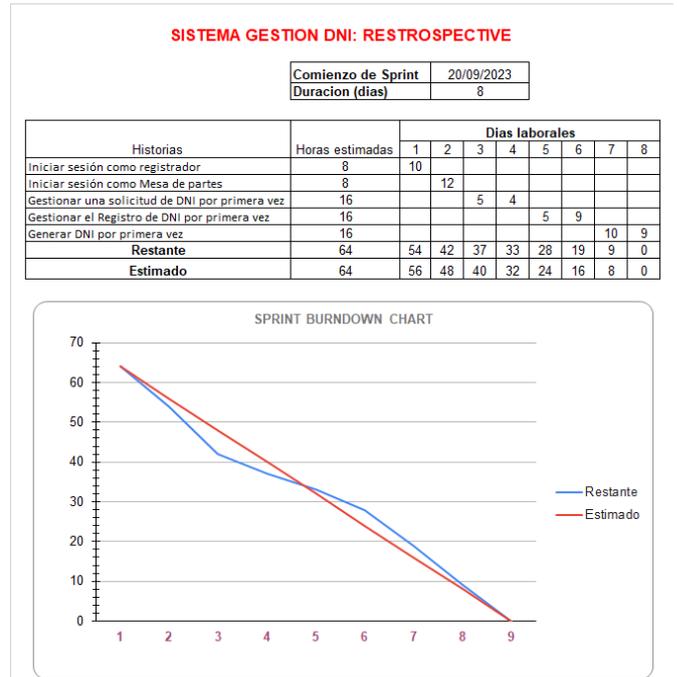
Correo Ingrese correo electrónico

Confir... Confirme correo electrónico

Reserva de cita

Tickets

Figura 19.  
Burndown del sprint 1.





# REVISTA INGENIO

## Análisis del Modelo de Desgaste Lineal de Archard, una Vista Dinámica al Modelo Original

### Analysis of the Archard Linear Wear Model, a dynamic View of the Original Model

Kevin Alexander Ortiz Santiana |  Unidad Educativa San José “La Salle”, Latacunga - Ecuador  
Michael Paul Vicente Andrade |  Pontificia Universidad Católica del Ecuador-PUCE, Quito - Ecuador

Recibido: : 7/5/2024

Recibido tras revisión: 5/6/2024

Aceptado: 28/8/2024

Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Modelo de Archard, desgaste, lineal, oscilatorio.

#### KEY WORDS

Archard's Model, wear, linear, oscillatory.

#### RESUMEN

El modelo Archard es un modelo lineal que describe el desgaste de un sistema deslizante. Sin embargo, si se desea aplicar este modelo a un sistema oscilante, se deben considerar algunas modificaciones y el uso de ecuaciones diferenciales puede ser una estrategia útil. En un sistema oscilante, las superficies de contacto realizan movimientos repetitivos hacia adelante y hacia atrás. Esto puede cambiar la forma en que se produce el desgaste porque las superficies pueden desgastarse en diferentes áreas. Además, la carga aplicada puede cambiar durante el ciclo de oscilación de una pieza, lo que también puede afectar al desgaste. Para modelar este tipo de sistema, se podría considerar el uso de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, según la complejidad del sistema. Estas ecuaciones le permitirán modelar cómo cambia el desgaste de elementos metálicos con el tiempo y cómo depende de factores como la posición y la velocidad en el ciclo de vibración.

#### ABSTRACT

The Archard model is a linear model that describes the wear of a sliding system. However, if you want to apply this model to an oscillating system, some modifications must be considered and the use of differential equations can be a useful strategy. In an oscillating system, the contact surfaces perform repetitive back-and-forth movements. This can change the way wear occurs because surfaces can wear in different areas during each vibration cycle. Additionally, the applied load can change during the oscillation cycle, which can also affect wear. To model this type of system, the use of ordinary or partial differential equations could be considered, depending on the complexity of the system. These equations will allow you to model how wear changes over time and how it depends on factors such as position and speed in the vibration cycle.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1950, se ha dedicado un considerable esfuerzo a desarrollar modelos que representen de manera adecuada la variación del desgaste durante el contacto entre superficies en movimiento [1]. Sin embargo, no se ha logrado un avance significativo en este campo. Las principales dificultades se deben a factores microscópicos como la calidad de la superficie, la heterogeneidad del material y la temperatura localmente generada, que complican el análisis con la mecánica clásica. La mayoría de los modelos descritos en la literatura han sido diseñados para sistemas tribológicos específicos, considerando pares de materiales, geometrías de contacto, ambientes y lubricantes determinados [2]. Además, estos modelos se han aplicado a condiciones operativas particulares. Dado que los cálculos de volumen de desgaste en procesos de

manufactura incluyen múltiples factores, esta investigación propone incorporar la característica oscilatoria en dichos cálculos, ya que el contacto entre dos superficies genera inevitablemente vibraciones.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio del desgaste de materiales ha sido un punto muy importante en la mecánica, el modelo propuesto de Archard realiza el estudio de este aspecto con una ecuación para un desgaste lineal, obteniendo como resultado el volumen de material desbastado; para el caso planteado, mediante la aplicación de las ecuaciones paramétricas de oscilación y el propio modelo de Archard [3], para

lo cual se pretende encontrar una variación del modelo lineal, el cual se pueda aplicar a un modelo oscilatorio, empleando ecuaciones diferenciales y destacando la diferencia entre el modelo original y el obtenido.

## 2.1. MARCO TEÓRICO

### MODELO DE ARCHARD

La ecuación del modelo lineal de Archard para piezas metalúrgicas es:

$$V = \frac{K.W.L}{H} \quad (I)$$

Donde:

$V$ : Volumen desbastado en [mm<sup>3</sup>]

$K$ : Coeficiente de desgaste [adimensional]

$L$ : Distancia de desplazamiento [mm]

$W$ : Fuerza normal aplicada [N]

$H$ : Dureza de penetración [N/mm<sup>2</sup>]

Es importante mencionar que este modelo tiene sus limitaciones y se aplica mejor a situaciones de desgaste por deslizamiento en seco.

Por lo cual el modelo de Archard ha ido evolucionando desde el primer modelo establecido hasta un modelo más reducido el cual insta que el volumen del material desgastado es proporcional al trabajo que realizan las fuerzas de fricción, es decir, que la variación del desgaste entre dos piezas metálicas es inversamente proporcional a la dureza de la materia y directamente proporcional a la carga que se le aplique generando una ecuación más sencilla [4].

$$\dot{W} = \frac{kP}{H}$$

Donde:

$\dot{W}$ : Rapidez de desgaste [mm<sup>2</sup>/s]

$P$ : Carga normal aplicada [N/s]

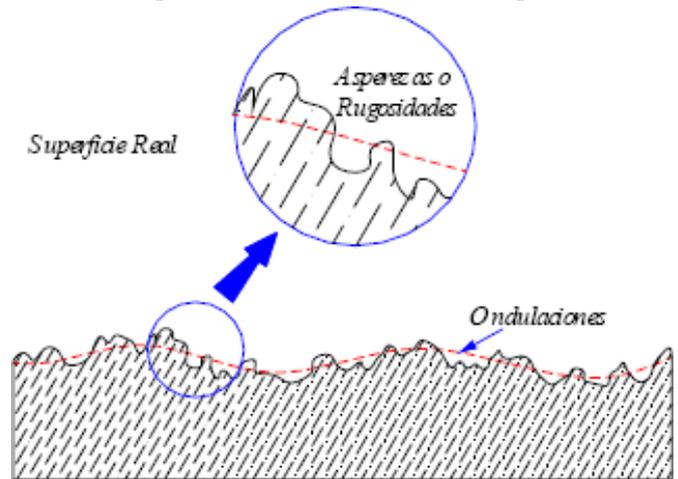
$H$ : Dureza del material [N/mm<sup>2</sup>]

$k$ : Constante de desgaste [Adimensional]

Este modelo, que aparentemente es muy simple, se utiliza con frecuencia en aplicaciones de ingeniería y ha servido como base para el desarrollo de modelos más complejos que buscan explicar los fenómenos de interacción de superficies de manera más amplia [5].

**Figura 1.**

Niveles de imperfecciones del contacto entre superficies.



Nota: Suárez y Vélez (2004) [10].

### CONTACTO ENTRE SUPERFICIES

El contacto entre superficies es un componente crucial del modelo de Archard. Este modelo establece que el contacto entre superficies se produce principalmente a través de las cimas más altas de sus asperezas. Esto indica que el área de contacto real que producen dos piezas metálicas es mucho menor que el área de contacto aparente [6]. Según el modelo de Archard, cuando las asperezas de las superficies en contacto se deslizan una contra la otra, ocurre el desgaste. Las asperezas pueden romperse durante este deslizamiento, lo que provoca la eliminación de material de la superficie y, por lo tanto, el desgaste.

**Figura 2.**

Descripción del contacto entre superficies y su lubricación



Nota: Vedan Alex (2023). La importancia de la lubricación industrial. <https://tractian.com/es/blog/lubricacion-industrial-analicemos-los-diferentes-tipos-de-lubricantes-y-su-importancia>

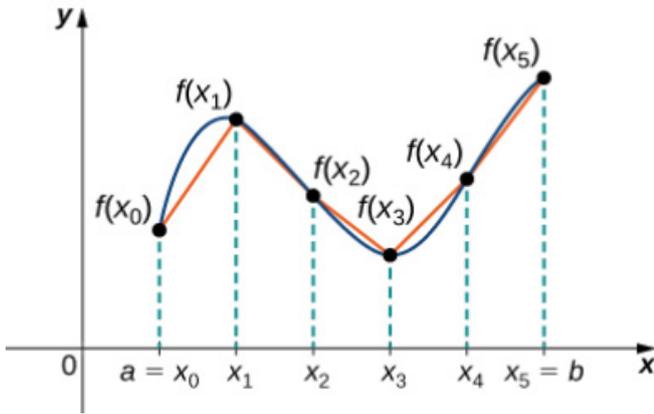
### LA LONGITUD DE ARCO

Es un principio esencial en las disciplinas de cálculo y geometría diferencial. Este principio se refiere a la medición de la distancia que se recorre a lo largo de una curva desde un punto hasta otro. En el ámbito de las ecuaciones diferenciales, este concepto de longitud de arco se emplea frecuentemente para parametrizar una curva. Esto significa que se utiliza para describir la ubicación de un punto específico en la curva con base en la distancia

que se ha recorrido desde un punto de inicio determinado [7]. En otras palabras, la longitud de arco permite expresar la posición de un punto en la curva en términos de cuánto se ha avanzado a lo largo de la curva desde un punto de referencia. Esto es especialmente útil en el estudio de las ecuaciones diferenciales, donde se busca entender cómo cambian las variables en función de una o más variables independientes. En este contexto, la longitud de arco proporciona una forma natural de describir el cambio en la posición a lo largo de una curva en función del tiempo o de otra variable independiente [8].

Figura 3.

Aproximación de una curva a su linealidad.



Nota: Juan Beltrán (2022). Longitud del arco de una curva y área de una superficie [9].

### FUNCIONES PARAMETRIZADAS

Las funciones parametrizadas son una herramienta valiosa para calcular la longitud de arco de una curva, debido a que, en lugar de describir una curva en función de una variable para ofrecer una mayor flexibilidad y generalidad, nos permite describir una amplia variedad de curvas que no pueden representarse fácilmente por una función univariable [10].

Ecuación general de cálculo de longitud de arco de curva parametrizada:

$$L = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt \quad (2)$$

Donde:

$L$ : Longitud de arco de curva [mm]

$\frac{dx}{dt}$ : Primera derivada de la función en “x” parametrizada de la curva

$\frac{dy}{dt}$ : Primera derivada de la función en “y” parametrizada de la curva

### 2.2. DESARROLLO

La ecuación del modelo original de Archard es la ecuación (1):

$$V = \frac{K.W.L}{H} \quad (1)$$

Dado que el modelo se fundamenta para un sistema oscilatorio, las funciones parametrizadas para la longitud de arco son las siguientes:

$$\begin{cases} x = A \cdot \cos(w \cdot t) \\ y = A \cdot \sin(w \cdot t) \end{cases} \quad (3)$$

Derivando ambas ecuaciones (3) se obtiene:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -A \cdot w \cdot \sin(w \cdot t) \\ \frac{dy}{dt} = A \cdot w \cdot \cos(w \cdot t) \end{cases} \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4) en la ecuación (2) se obtiene:

$$L = \int_a^b \sqrt{[-A \cdot w \cdot \sin(w \cdot t)]^2 + [A \cdot w \cdot \cos(w \cdot t)]^2} dt \quad (5)$$

Desarrollando la ecuación (5) se tiene:

$$L = \int_a^b \sqrt{A^2 w^2 \sin^2(w \cdot t) + A^2 w^2 \cos^2(w \cdot t)} dt$$

Sacando factor común la expresión se obtiene:

$$L = \int_a^b \sqrt{A^2 w^2 [\sin^2(w \cdot t) + \cos^2(w \cdot t)]} dt$$

Aplicando la identidad trigonométrica

$$L = \int_a^b \sqrt{A^2 w^2 (1)} dt$$

Entonces:

$$L = \int_a^b A \cdot w \cdot dt$$

$$L = A \cdot w \int_a^b dt$$

$$L = A \cdot w \cdot t \Big|_a^b$$

$$L = A \cdot w (b - a) \quad (6)$$

Finalmente, reemplazando la ecuación (6) en la ecuación (1) se obtiene:

$$V = \frac{K.W.A.w.(b-a)}{H} \quad (7)$$

Donde:

$V$ : Volumen desbastado en [mm<sup>3</sup>]

$K$ : Coeficiente de desgaste [adimensional]

$W$ : Fuerza normal aplicada [N]

$H$ : Dureza de penetración [N/mm<sup>2</sup>]

$A$ : Amplitud de la onda [mm]

$w$ : Velocidad angular [rd/s]

$(b - a)$ : Periodo aplicado en el proceso [s]

$$W = 500[\text{Kgf}] * 9,81[\text{N}]$$

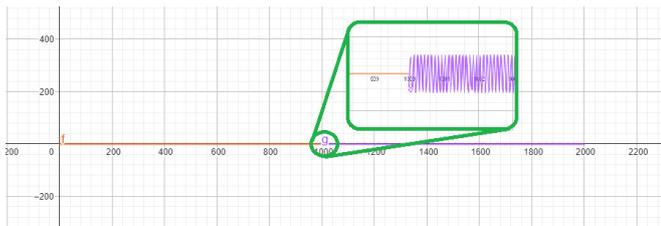
$$W = 4905[\text{N}]$$

#### CASO DE ESTUDIO

Calcular el volumen de desgaste en la ecuación clásica del modelo de Archard y en el modelo obtenido, considerando un proceso de mecanizado de dos metros, donde el primer metro va a ser calculado con el modelo clásico y el segundo metro con el modelo oscilatorio; el material a ser procesado es un acero A36, y el material que va a desarrollar el proceso es una herramienta de tipo HSS, considerar para el modelo una oscilación de amplitud de medio milímetro con un periodo de una décima de segundo, la cual representará una vibración constante en dicho proceso.

**Figura 4.**

Caso de estudio



Nota: Se muestra el punto de cambio de los dos procesos.

Para obtener los datos, es necesario revisar literatura, donde se especifica valores típicos de constante de desgaste, la cual para procesos sin lubricación el valor es de aproximadamente 0,01 [13]; para la fuerza normal aplicada [14] afirma que el valor medio de la dureza del acero A36 es de 140 HB, dicho valor deberá ser transformado a unidades especificadas en las ecuaciones y, finalmente, el valor de la fuerza normal para este tipo de materiales es de 500 [Kgf]; según [15], este valor deberá ser convertido a las unidades establecidas en las ecuaciones.

Para obtener el valor de la dureza del acero A36, en N/mm<sup>2</sup>, se tiene que multiplicar el valor de la dureza por 9,81 ya que 1 HB = 9,81 [N/mm<sup>2</sup>] es decir:

$$H = 140 * 9,81$$

$$H = 1373,4 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Para obtener el valor de la fuerza normal se debe multiplicar el valor por 9,81 puesto que 1 Kgf = 9,81[N], entonces se obtiene:

#### Cálculo del volumen de desgaste a partir del modelo clásico de Archard

Datos:

$$K = 0,01$$

$$L = 1000 \text{ [mm]}$$

$$W = 4905 \text{ [N]}$$

$$H = 1373,4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$V = \frac{(0,01)(4905[\text{N}])(1000[\text{mm}])}{(1373,4 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right])}$$

$$V = 33,71 \text{ [mm}^3\text{]}$$

#### Cálculo del volumen de desgaste a partir del modelo oscilatorio de Archard

Datos:

$$K = 0,01$$

$$W = 4905 \text{ [N]}$$

$$H = 1373,4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$A = 0,5 \text{ [mm]}$$

$$w = 62,83 \text{ [rd/s]}$$

$$(b - a) = 50 \text{ [s]}$$

$$V = \frac{(0,01)(4905[\text{N}])(0,5[\text{mm}])(62,83 \left[ \frac{\text{rd}}{\text{s}} \right])(50[\text{s}] - 0[\text{s}])}{1373,4 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]}$$

$$V = 56,09 \text{ [mm}^3\text{]}$$

### 3. RESULTADOS

La ecuación obtenida como resultado del análisis oscilatorio, muestra un comportamiento que ciertamente se asemeja más a la realidad, ya que el simple hecho de que se produzca el contacto entre dos superficies provoca vibraciones, es así que el volumen calculado por el modelo clásico de Archard se obtiene un desgaste de 33,71 mm<sup>3</sup>, los cuales representarían un 100% de desgaste teórico, pero al aplicar el modelo oscilatorio obtenido en el desarrollo de la investigación se obtiene un desgaste de 56,09 mm<sup>3</sup>, sobrepasando aproximadamente con un 66% a la cantidad de desgaste obtenido con el modelo clásico, pues como se manifestó anteriormente, este no considera las vibraciones dentro del proceso.

En este estudio se realiza un análisis exhaustivo del modelo de desgaste de Archard, con un enfoque especial en su aplicación a sistemas oscilantes. Se presentan los resultados obtenidos, que subrayan las diferencias

significativas entre el modelo clásico y el modelo modificado propuesto.

### 1. Comparación de desgaste entre modelos

El análisis demuestra que el modelo oscilatorio modificado genera un volumen de desgaste considerablemente mayor en comparación con el modelo clásico de Archard. El modelo clásico calcula un desgaste teórico de  $33,71 \text{ mm}^3$ , que representa el 100% del desgaste estimado bajo condiciones de deslizamiento. No obstante, al aplicar el modelo oscilatorio, se obtiene un volumen de desgaste de  $56,09 \text{ mm}^3$ , lo que implica un aumento del 66% en el desgaste predicho. Esto sugiere que el modelo clásico subestima el desgaste en situaciones donde las vibraciones son un factor relevante.

### 2. Impacto de la oscilación en el desgaste

El análisis detallado del comportamiento del desgaste en sistemas oscilantes revela que las vibraciones alteran la distribución del desgaste en las superficies de contacto. En un sistema oscilante, las superficies experimentan movimientos repetitivos que pueden provocar un desgaste desigual. Esto ocurre porque las áreas de contacto cambian durante cada ciclo de oscilación, resultando en un desgaste concentrado en distintas regiones de las superficies en contacto.

### 3. Efecto de parámetros dinámicos

La inclusión de parámetros dinámicos, como la amplitud de oscilación ( $A$ ), la velocidad angular ( $w$ ) y el tiempo de oscilación ( $b - a$ ), permite una representación más precisa del desgaste. Estos parámetros se integran en la ecuación del modelo modificado, proporcionando una mejor comprensión de cómo las condiciones dinámicas influyen en el desgaste de los materiales. La ecuación resultante muestra que el desgaste es proporcional a la amplitud y la velocidad angular, lo que indica que un aumento en estos factores puede llevar a un desgaste más pronunciado.

### 4. Validación del modelo modificado

Los resultados obtenidos con el modelo oscilatorio se validan mediante comparaciones con datos experimentales y simulaciones numéricas. La coincidencia entre los resultados teóricos y los datos experimentales sugiere que el modelo modificado es una herramienta eficaz para predecir el desgaste en condiciones dinámicas. Esto es especialmente relevante en aplicaciones industriales donde las condiciones de operación varían y el desgaste puede afectar significativamente la vida útil de herramientas y componentes.

## 5. Implicaciones para la ingeniería y la manufactura

Los hallazgos de este estudio tienen importantes implicaciones para la ingeniería y los procesos de manufactura. La capacidad de predecir el desgaste con mayor precisión en sistemas oscilantes puede optimizar los procesos de producción, mejorando la eficiencia y la calidad de los productos. Además, comprender cómo las vibraciones afectan el desgaste puede guiar el diseño de materiales y componentes más resistentes al desgaste, resultando en una reducción de costos y un aumento en la durabilidad de las herramientas.

### 3.1. DISCUSIÓN

El modelo original de Archard se basa en la premisa de que el desgaste ocurre principalmente a través de las asperezas de las superficies en contacto, lo que implica que el área de contacto real es mucho menor que el área de contacto aparente. Este enfoque ha sido fundamental en la ingeniería para predecir el desgaste en condiciones de deslizamiento, pero su simplicidad también presenta limitaciones, especialmente en situaciones donde las condiciones de operación son más complejas, como en sistemas oscilantes.

La investigación sugiere que al aplicar el modelo de Archard a sistemas oscilantes, es crucial considerar las variaciones en la carga y el movimiento de las superficies de contacto. En un sistema oscilante, las superficies no solo se deslizan, sino que también realizan movimientos repetitivos hacia adelante y hacia atrás, lo que puede llevar a un desgaste diferente en comparación con un sistema de deslizamiento puro. Esto se debe a que las áreas de contacto pueden cambiar durante cada ciclo de oscilación, lo que afecta la distribución del desgaste a lo largo de las superficies.

Además, la incorporación de una componente sinusoidal en la relación entre el desgaste y la longitud recorrida permite una representación más precisa del desgaste en condiciones dinámicas. Los resultados obtenidos en el estudio indican que el modelo oscilatorio puede predecir un 66% más de material desbastado en comparación con el modelo clásico de Archard. Esto resalta la importancia de considerar las vibraciones y la dinámica del sistema al modelar el desgaste, lo que puede tener implicaciones significativas para la optimización de procesos de manufactura.

Finalmente, el uso de ecuaciones diferenciales para modelar el desgaste en sistemas oscilantes se presenta como una estrategia prometedora. Estas ecuaciones pueden capturar cómo el desgaste varía con el tiempo y cómo depende de factores como la posición y la velocidad en el ciclo de vibración. Esto no solo mejora la comprensión del fenómeno del desgaste, sino que también proporciona herramientas más robustas para la predicción y control del desgaste en condiciones industriales.

La modificación del modelo de Archard para incluir dinámicas oscilatorias representa un avance significativo en la comprensión del desgaste en sistemas complejos. Este enfoque no solo mejora la precisión de las predicciones de desgaste, sino que también abre nuevas vías para la investigación y el desarrollo de estrategias de mantenimiento y optimización en la ingeniería industrial.

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha obtenido y analizado un modelo modificado del clásico modelo de desgaste de Archard mencionado en la ecuación (1); considerando la dinámica en procesos mediante la incorporación de una componente sinusoidal en la relación entre el desgaste y la longitud recorrida como la expresión . Los resultados obtenidos muestran que, al introducir la amplitud de la oscilación ( $\delta$ ), la velocidad angular ( $\omega$ ) y el tiempo aplicado de la oscilación ( $t$ ), se puede obtener una representación más precisa del desgaste en situaciones donde las vibraciones son significativas durante procesos de desbaste u operaciones similares, al analizar ambos resultados de los volúmenes obtenidos se puede evidenciar claramente el impacto que tiene la componente sinusoidal en dicho proceso, comparando los resultados, el modelo oscilatorio obtiene un 66% más de material desbastado.

Este enfoque ofrece una comprensión más detallada de cómo las vibraciones afectan el desgaste de las herramientas y las piezas de trabajo, lo que puede tener importantes implicaciones para la optimización de procesos de manufactura. En comparación con el modelo de Archard original, el modelo modificado proporciona una herramienta más completa para la predicción y control del desgaste en condiciones dinámicas, lo que puede contribuir a la mejora de la eficiencia y la calidad en la producción industrial.

#### Recomendaciones

Es recomendable realizar validaciones experimentales en software para verificar la fiabilidad del modelo propuesto en condiciones reales de procesos de manufactura. Además, se sugiere considerar otros factores que puedan influir en el desgaste, como la temperatura y la lubricación para futuras investigaciones del modelo en diferentes campos de la ingeniería y en otros tipos de procesos de manufactura para ampliar su impacto y relevancia.

#### REFERENCIAS

[1] Alexander, F., Bustamante, S., Manuel, J. & Restrepo, V. *Estudio del modelo de desgaste propuesto por Archard*, 2004. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614603>

- [2] Arroyo, A. Imbaquingo, K. *Modelización matemática del desgaste en pastillas de freno de vehículos*. Universidad Técnica del Norte, 2023.
- [3] Da Silva, C. R. Á., & Pintaude, G. "Uncertainty analysis on the wear coefficient of the Archard model". *Tribology International*, vol. 41, n.º 6, 473-481, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.10.007>
- [4] Mattei, L. & Francesco Di Puccio, F. (2023). "How accurate is the Archard law to predict wear of UHMWPE in hard-on-soft hip implants? A numerical and experimental investigation". *Tribology International*, vol. 187. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108768>
- [5] Santana Reyes, S. A., Santana Milán, R., Guardia Puebla, Y., & Morales Leslie, J. F. "Determinación de los principales factores geométricos que influyen en el desgaste de las matrices de extrusión directa empleadas en la obtención en frío de perfiles de aleaciones de aluminio". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 20, n.º 4, pp. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.22201/1.25940732e.2019.20n4.037>
- [6] Jiménez Torrado. *Comparación del desgaste por abrasión y el desgaste por deslizamiento de los aceros AISI/SAE 1020, 1045 y 4140, según las normas ASTM G65 y G99*. Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica, 2009.
- [7] Romero Contreras, J. E., & Cabello Sequera, S. B. "Comportamiento ante el desgaste por deslizamiento en seco del acero inoxidable súper dúplex en un tribómetro bola sobre anillo". *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 22, n.º 1, pp. 6-17, 2020. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.60835>
- [8] Mariana Nieto. *Diseño de un modelo físico aplicando ecuaciones diferenciales*. tesis.pdf (unam.mx), 2015.
- [9] Juan Beltrán. Longitud del arco de una curva y área de una superficie, 2022. <https://calculo21.com/longitud-del-arco-de-una-curva-y-area-de-una-superficie/>
- [10] Miguel Rodríguez. Cálculo diferencial e integral II: Longitud de arco - El blog de Leo (nekomath.com), 2022.
- [11] Mena, Granizo, Hernández, Audelo. Cálculo de la velocidad de desgaste abrasivo en engranajes de dientes rectos y helicoidales con perfil envolvente, utilizando una GUI de Matlab, 2023. [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-860X2023000100032](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2023000100032)
- [12] Vedan Alex. La importancia de la lubricación industrial, 2023. <https://tractian.com/es/blog/lubricacion-industrial-analicemos-los-diferentes-tipos-de-lubricantes-y-su-importancia>
- [13] Ramírez-Cuellar, Jorge & Chavela, Julio & Sandoval-Caballero, Ignacio & Cantu-Rangel, Miguel & Olvera-Briseno, José. Desgaste en rodillos de trabajo ICDP, HSS, HICR en el cuarto castillo en un laminador tipo compacto y uno convencional de productos planos, 2003.

[14] Ruiz Zelada, Marco. Compendio de normas para productos de acero, 2000.

[15] Struers Ensuring Certainty. Ensayos de dureza (s. f.) <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#>



# REVISTA INGENIO

## Inteligencia Artificial: Machine Learning, para Detección Temprana de Plagas y Enfermedades de Cultivos Básicos, Nicaragua

### Artificial Intelligence: Machine Learning for Early Detection of Pests and Diseases in Basic Crops, Nicaragua

Saira María Urbina Cienfuegos | Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua- UNAN, Managua-Nicaragua  
Jazcar Josué Bravo Rivas | Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua- UNAN, Managua-Nicaragua

Recibido: 23/7/2024

Recibido tras revisión: 15/10/2024

Aceptado: 11/11/2024

Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Machine learning, plagas, enfermedades, cultivos.

#### KEY WORDS

Machine learning, pests, diseases, crops

#### RESUMEN

El presente artículo, muestra aspectos relevantes del proceso de desarrollo de la aplicación móvil que incorpora técnicas de Machine Learning para detectar de forma temprana plagas y enfermedades en cultivos de granos básicos como maíz, frijol y sorgo, estos son indispensables para el consumo humano en Nicaragua. Se utilizó metodología de desarrollo ágil Scrum, se adoptaron tecnologías como Android Studio, lenguaje de programación Java, Google Teachable Machine para entrenamiento del modelo de aprendizaje automático y TensorFlow Lite para incorporar modelo en la aplicación móvil. Los resultados muestran un Sprint con sus historias de usuarios, estas se convirtieron en funcionalidades que incluyen el modelo para el reconocimiento de imágenes con precisión de 95.8% utilizando un conjunto de datos de 252 imágenes de cultivos sanos y enfermos. La metodología indica organización de la programación según patrón Modelo – Vista – Controlador y métricas utilizadas por el modelo. Las conclusiones hacen énfasis en detalles de los resultados obtenidos en Sprint#1. Al final, también se mencionan retos a superar al aplicar aprendizaje automático en el sector agrícola.

#### ABSTRACT

The present article highlights relevant aspects of the development process of the mobile application that incorporates Machine Learning techniques to early detect pests and diseases in staple grain crops such as corn, beans, and sorghum, which are essential for human consumption in Nicaragua. Agile development methodology Scrum was used, technologies such as Android Studio, Java programming language, Google Teachable Machine for training the machine learning model, and TensorFlow Lite for incorporating the model into the mobile application were adopted. The results show a Sprint with its user stories, which were turned into functionalities that include the model for image recognition with an accuracy of 95.8% using a dataset of 252 images of healthy and diseased crops. The methodology indicates the organization of programming according to the Model-View-Controller pattern and the metrics used by the model. The conclusions emphasize details of the results obtained in Sprint#1. In the end, challenges to overcome in applying machine learning in the agricultural sector are also mentioned.

## I. INTRODUCCIÓN

La agricultura es un sector fundamental en la economía nicaragüense porque constituye la fuente principal de alimentos básicos para el consumo humano. Sin embargo, cada año se ve afectada debido a que los cultivos son atacados por plagas y enfermedades [1]. Es complicado controlarlas y evitar que se propaguen de forma exponencial, generando pérdidas considerables, debido a que se reduce el volumen de producción previsto lo que repercute de manera significativa en la economía y seguridad

alimentaria del país. Los agricultores pueden hacer frente a esta problemática en etapa temprana, apoyándose en tecnologías de precisión y monitoreo, que les permitan optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia en la gestión de cultivos [2].

En el año 2022, la FAO ( Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) estimó que las plagas y enfermedades de las plantas provocan pérdidas de hasta el 40 % de los cultivos alimentarios, y los daños que generan en

la agricultura agravan el problema existente del aumento del hambre mundial y amenazan los medios de vida rurales [3]. Sin embargo, en Nicaragua, por ahora no se dispone de estadísticas sobre las pérdidas ocasionadas por plagas y enfermedades en los granos básicos. Asimismo, la falta de datos y las pocas herramientas e instrumentos apropiados para la recolección de información dificulta la elaboración de planes de contingencia efectivos por parte de agricultores y autoridades.

El avance significativo de la agricultura de precisión y el desarrollo digital ha hecho posible el monitoreo en tiempo real haciendo uso de imágenes satelitales, maquinaria autónoma, drones y sensores, asimismo, el análisis oportuno de datos y la aplicación precisa de insumos en los cultivos [4]. De igual forma, la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial (IA), tales como el aprendizaje automático (Machine Learning) con capacidad de analizar y clasificar grandes volúmenes de datos utilizando algoritmos como las Redes Neuronales Convulsionales (Convolutional Neural Networks - CNN) que se caracterizan por resolver problemas asociados con la clasificación y reconocimientos de imágenes y audio [5], por esta razón, se utilizan para identificación temprana de daños en cultivos causados por plagas o enfermedades, de esta forma apoyar a los agricultores con la gestión eficiente de sus recursos.

El uso de la tecnología representan un avance crucial en la gestión agrícola y es posible incorporarla en aplicaciones que se convierten en agentes que monitorean cultivos, proporcionando respuestas oportunas para minimizar daños y proteger el rendimiento de los mismos [6]. En diversas partes del mundo se han creado soluciones acertadas a problemas agrícolas y coinciden en que la introducción de la IA y el aprendizaje automático en la agricultura tiene el potencial de generar avances previamente inalcanzables en la optimización del rendimiento, la detección de enfermedades y la gestión de cultivos [7]. Los estudios consultados desarrollaron modelos entrenados de aprendizaje automático con CNN para identificar plagas y enfermedades en variedad de cultivos, en su mayoría de consumo humano frecuente, como arroz, frijol y hortalizas [5].

Ante esta problemática aquí descrita y aprovechando las bondades de las tecnologías actuales, este estudio tiene como objetivo el desarrollo de una aplicación móvil que incorpora un modelo de aprendizaje automático (Machine Learning) entrenado con imágenes de cultivos (maíz, frijol y sorgo) sanos y enfermos para la detección de plagas y enfermedades. Estos en la actualidad enfrentan amenazas importantes, como el gusano cogollero en maíz, la antracnosis en frijol y la mosca del sorgo

que reducen su productividad y afectan la seguridad alimentaria del país [8].

## 2. MÉTODO

El tipo de investigación es mixta debido a la utilización de enfoques cuantitativos y cualitativos. De acuerdo al estudio a través del conocimiento, es descriptiva debido a que se detallan nombres, características y otros elementos referentes a cultivos, plagas y enfermedades, lo que permitió especificar requerimientos a cumplir en el software, enfocado en el problema identificado [9].

Por otra parte, es un estudio retrospectivo, debido a que la identificación de requerimientos para la aplicación móvil se llevó a cabo durante el año 2023; y según su cobertura es de corte transversal.

Este estudio está enfocado en identificar seis plagas y tres enfermedades comunes en tres cultivos, maíz, frijol y sorgo. Por ello, se recolectaron imágenes de cultivos sanos, las cuales fueron tomadas directamente en el campo en compañía de agricultores. También se obtuvieron imágenes que muestran afectaciones de estas plagas y enfermedades, estas fueron facilitadas por técnicos de campo, en total se utilizaron como muestra 252 imágenes. Además, se consultó manual del Tecnológico Nacional (INATEC) para obtener características que tienen cultivos afectados por plagas y enfermedades.

### 2.1 TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS

Según las funcionalidades a implementar se seleccionaron las tecnologías:

- Android SDK como Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para aplicaciones móviles [10].
- Java, lenguaje de programación orientado a objetos, con bibliotecas dispuestas para su uso [11].
- Google Teachable Machine, herramienta basada en la web para entrenamiento de modelos de Machine Learning, utiliza Redes Neuronales Convulsionales (CNN), estas aprenden estructuras jerárquicas, niveles de representación y abstracción para comprender los patrones de datos que provienen de una fuente, en este caso imágenes. Utiliza aprendizaje supervisado, los datos facilitados para el entrenamiento incluyen la solución deseada llamada etiqueta [12], [13].
- TensorFlow Lite, facilita la ejecución de modelos de aprendizaje automático para el despliegue del modelo de Machine Learning en dispositivos móviles, permitiendo trabajar sin conexión a Internet [14].
- Cloud Firestore y Realtime Database, servicios de bases de datos en la nube, que permiten almacenamiento y sincronización de datos en tiempo real [15].

La selección de estas tecnologías se realizó con base en la experiencia de uso y la curva de aprendizaje del equipo de trabajo.

## 2.2 ENTRENAMIENTO DEL MODELO MACHINE LEARNING

Se consideraron características relevantes para la selección de la tecnología utilizada en el entrenamiento del modelo de Machine Learning (ML), que permite reconocer imágenes referentes a plagas y enfermedades en los cultivos básicos. Se optó por Google Teachable Machine; tiene una interfaz visual, flexible y accesible, no requiere experiencia en ML o codificación, facilitando el entrenamiento e implementación de modelos rápidamente [16]. En [17] the system development method used is the waterfall which starts from the requirements analysis stage, system design, system implementation, system testing and system maintenance. The design of this system uses flowcharts, Unified Modeling Languages (UML se indica que esta tecnología puede generar un modelo de aprendizaje automático con una tasa de precisión de prueba de hasta el 100%, lo que fue considerado importante por el equipo de trabajo.

El proceso de entrenamiento del modelo que utiliza Red Neuronal Convulsional (CNN) en Google Teachable Machine, enfocado en la identificación de plagas y enfermedades en cultivos de maíz, frijol y sorgo consistió en realizar un pilotaje con 252 imágenes clasificadas en 12 clases (neuronas), a cada clase se asignaron 21 muestras, para mantener un número equilibrado de imágenes, evitar sesgos y asegurar la precisión del modelo. Las imágenes fueron preprocesadas por la herramienta a tamaño uniforme de 224x224 píxeles. La tabla 1 muestra detalles de la cantidad de imágenes seleccionadas por clase.

Para que el modelo pueda identificar correctamente enfermedades o plagas, se seleccionaron imágenes claras y de alta calidad, enfocando de forma directa en una muestra del daño en la planta o plaga que la afecta, hacer tomas con escasa iluminación, bajo lluvia o condiciones de neblina, puede afectar la calidad de las imágenes. En la tabla 2 (Anexo tabla2) se muestran detalles que presentan los cultivos según enfermedad o plaga que los afecta.

Para medir el rendimiento del modelo al clasificar las muestras en Google Teachable Machine se utiliza:

- Matriz de confusión, muestra el grado de precisión de las predicciones, consiste en una tabla que resume el número de predicciones correctas e incorrectas realizadas por el modelo [18]. La tabla 3, muestra variables utilizadas por la matriz que permiten calcular otras métricas como precisión y exactitud (accuracy) del modelo.

- Precisión por clase, se calcula usando muestras de prueba (15% de los datos), Se dividen los verdaderos positivos (VP) entre la suma de VP y los Falsos Positivos (FP) [18].

$$\text{Precisión} = \frac{\text{Clasificaciones correctas}}{\text{Clasificaciones positivas}} = \frac{VP}{VP+FP} \quad (1)$$

- Exactitud (Accuracy) del modelo al clasificar, corresponde a proporción de predicciones correctas positivas y negativas [18], la fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{Exactitud} = \frac{\text{Clasificaciones correctas}}{\text{Total de clasificaciones}} = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (2)$$

- Precisión de época, indica el porcentaje de clasificaciones que un modelo acierta durante la preparación.

## 2.3 Desarrollo de aplicación

Se utilizó Metodología Ágil (Scrum) para organizar el desarrollo de la aplicación móvil; esta ayuda a personas, equipos y organizaciones a generar valor a través de soluciones adaptativas para problemas complejos, contiene artefactos que representan trabajo o valor, de esta forma, Product Backlog representa el objetivo del producto, Sprint Backlog es el objetivo del Sprint y el Increment corresponde a las funcionalidades terminadas [19].

Los requerimientos del proyecto se escribieron como historias de usuarios (HU) y se organizaron por prioridad, de esta forma se obtuvo el Producto Backlog como una lista emergente y ordenada, posteriormente, se dividió en Sprints, generando subproductos terminados. Para cada Sprint se define el Sprint Backlog, este es un plan de trabajo realizado por el equipo de desarrollo, se pueden crear varios incrementos dentro de un Sprint, estos son considerados pequeños avances hacia el objetivo del producto [19].

Para estructurar el código de la aplicación móvil en Android, se seleccionó el patrón Modelo-Vista- Controlador (MVC), que permite organizar el código de la vista y el acceso a datos de forma separada. Esto divide conceptualmente la aplicación en tres elementos y facilita hacer cambios en cualquiera de las partes [20].

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La identificación de requerimientos para el desarrollo de la aplicación móvil se realizó utilizando la metodología ágil Scrum. En este proyecto se crearon 18 historias de usuarios, las cuales se organizaron en 5 Sprint, cada uno generó un entregable correspondiente a las funcionalidades completadas en un periodo de tiempo de 3 semanas. Durante esta fase, el equipo de desarrollo trabajó estrechamente con el usuario final (dueño del producto, téc-

**Tabla 1.**

Clasificación de imágenes por clase

Clasificación	Etiquetado de clases	Cantidad
Cultivo Sano	Frijol	21
	Maíz	21
	Sorgo	21
Enfermedades	Mosaico dorado (BGYMV)	21
	Roya (Puccinia sorghi)	21
	Mancha zonada (Gloeocercospora sorghi)	21
Plagas	Mosca blanca (Bemisia tabaci)	21
	Chicharrita verde (Empoasca kraemer)	21
	Gallina ciega (Phyllophaga sp)	21
	Cogollero (Spodoptera frugiperda)	21
	Mosquita del sorgo (Contarinia sorghicola)	21
	Barrenador mayor del tallo (Diatraea saccharalis)	21
Total		252

**Tabla 3.**

Variables de matriz de confusión

	Positivo real	Negativo real
Predicción positiva	<b>Verdadero positivo (VP):</b> casos positivos, clasificado correctamente como positivos.	<b>Falso positivo (FP):</b> casos negativos, pero el modelo predijo como positivo.
Predicción negativa	<b>Falso negativo (FN):</b> casos positivos, pero el modelo predijo como negativo.	<b>Verdadero negativo (VN):</b> casos negativos y el modelo predijo como negativos.

nicos de campo y agricultores) quien tiene conocimiento de las necesidades que deben abordarse a través de las funcionalidades del software [21].

En este artículo, se hace referencia a Sprint #1, porque contienen las historias de usuario (HU) particularmente valiosas para el proyecto. Los elementos que tienen mayor valor para el cliente deben priorizarse al inicio, con la expectativa de ser trabajados de primero [22].

### RESULTADOS SPRINT #1

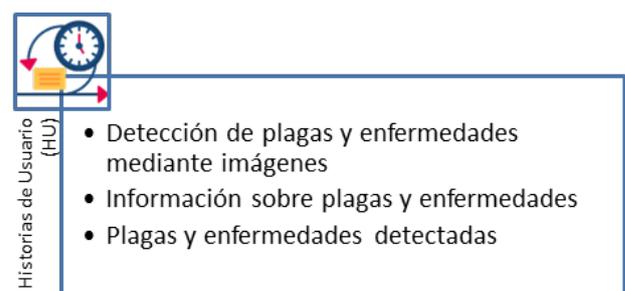
La figura 1 muestra Sprint Backlog del Sprint #1. Se establecieron 3 historias de usuarios, cada una se desglosó en tareas pequeñas. Se completó en un periodo de 3 semanas y se logró el primer subproducto funcional del proyecto.

En el primer Sprint planificado, se obtuvo como resultado un modelo de Machine Learning entrenado que permite detectar plagas y enfermedades específicas de los cultivos: maíz, frijol y sorgo, las principales tareas realizadas fueron:

- Recopilación y clasificación de datos

**Figura 1.**

Sprint Backlog #1

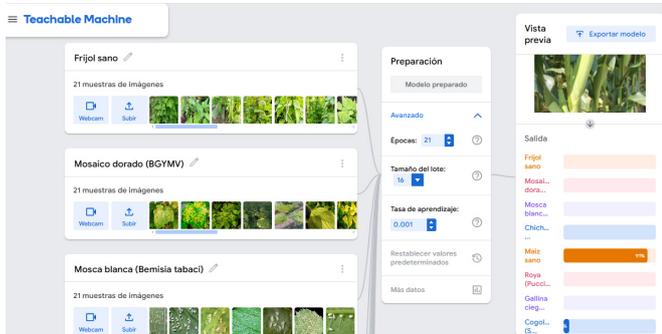


- Creación del proyecto de aprendizaje automático (ML) en Google Teachable Machine.
- Etiquetado de 12 clases con 21 imágenes para cada una.
- Establecimiento de parámetros en Google Teachable Machine: 21 épocas (Cantidad de veces que se prueban los datos de muestra), 16 lotes (predeterminado) y una tasa de aprendizaje 0.0001 (predeterminado).
- Preparación y prueba del modelo en Google Teachable Machine.
- Exportación del modelo a TensorFlow Lite
- Incorporación del modelo entrenado a la APP móvil

- Diseño de interfaz de usuario para información y detección de plagas y enfermedades desde la APP móvil.

La Figura 2, muestra el proceso de entrenamiento del modelo de aprendizaje automático (ML) en Google Teachable Machine, subproducto obtenido en Sprint #1.

**Figura 2.**  
Entrenamiento del Modelo ML – Entregable Sprint #1



Como resultado del entrenamiento del modelo de aprendizaje automático (ML) en Google Teachable Machine, la red neuronal ajustó sus pesos y sesgos a lo largo de 21 épocas, procesando 252 imágenes divididas en lotes de 16, lo que resultó en 15 lotes por época. Este ajuste de parámetros permitió que la red aprendiera de la mejor manera posible. La tasa de aprendizaje, considerado un hiperparámetro crítico, se seleccionó cuidadosamente para equilibrar la rapidez del entrenamiento y la estabilidad del modelo. La configuración avanzada en Google Teachable Machine permitió establecer estos parámetros para optimizar el rendimiento.

Durante el proceso de entrenamiento del modelo, se obtuvieron dos resultados relevantes:

- Precisión de las 12 clases igual a 1
- Precisión de 10 clases igual a 1 y 2 clases con precisión 0.75

En ambos procesos de entrenamiento se utilizaron la misma cantidad de clases, cantidad de imágenes, y la misma configuración, sin embargo, refleja resultados diferentes en la precisión por clase. Esto se debe a que el algoritmo selecciona muestras aleatorias para la división de datos del modelo y puede generar leves variaciones. La figura 3 muestra la precisión por clase obtenida en cada proceso, para ambos el algoritmo ha tomado 4 imágenes de las 21 facilitadas por clase como muestra para validar el modelo.

Los modelos de aprendizaje automático en Google Teachable Machine utilizan 85% de los datos para entrenamiento y 15% de datos para validación, aspecto esencial para evaluar y ajustar el modelo. De esta manera, se asegura no solo que aprenda a clasificar correctamente durante el entrenamiento, sino que también generalice bien con datos nuevos.

**Figura 3.**  
Precisión por clase

CLASS	ACCURACY	# SAMPLES
Frijol sano	1.00	4
Mosaico dorado (BG...	1.00	4
Mosca blanca (Bemi...	1.00	4
Chicharrita verde ...	1.00	4
Maiz sano	1.00	4
Roya (Puccinia sor...	1.00	4
Gallina ciega (Phy...	1.00	4
Cogollero (Spodopt...	1.00	4
Sorgo sano	1.00	4
Mancha zonada (Glo...	1.00	4
Mosquita del sorgo...	1.00	4
Barrenador mayor d...	1.00	4

CLASS	ACCURACY	# SAMPLES
Frijol sano	1.00	4
Mosaico dorado (BG...	1.00	4
Mosca blanca (Bemi...	1.00	4
Chicharrita verde ...	1.00	4
Maiz sano	1.00	4
Roya (Puccinia sor...	1.00	4
Gallina ciega (Phy...	1.00	4
Cogollero (Spodopt...	1.00	4
Sorgo sano	0.75	4
Mancha zonada (Glo...	1.00	4
Mosquita del sorgo...	0.75	4
Barrenador mayor d...	1.00	4

Nota. Resultados en Google Teachable Machine

Como puede observarse en la Figura 3, uno de los resultados presenta una exactitud de 1.00 para todas las clases durante la validación, mientras que el otro muestra variación en dos clases: “Sorgo sano” y “Mosquita del sorgo”, obteniendo en las mismas 0.75 de precisión en ambas. Esto indica que el 83% de las clases las puede predecir correctamente, sin embargo, el modelo presenta dificultades en la clasificación del 17% restante, sugiriendo que podría estar confundiéndolas con otras. Las características similares afectan en gran medida el reconocimiento de objetos, por lo que el valor de precisión puede disminuir y se dividirá en otras muestras de clase [23].

La matriz de confusión obtenida del entrenamiento del modelo que generó diferencias en la precisión de dos clases, se muestra en la Figura 4. Esta tabla tiene un tamaño de 12 filas por 12 columnas, las clases reales previamente etiquetadas en Google Teachable Machine se encuentran en las filas y en las columnas se ubican las predicciones realizadas. En la diagonal principal resaltada en color azul se visualizan las clasificaciones correctas, los valores fuera de la diagonal indican predicciones incorrectas.

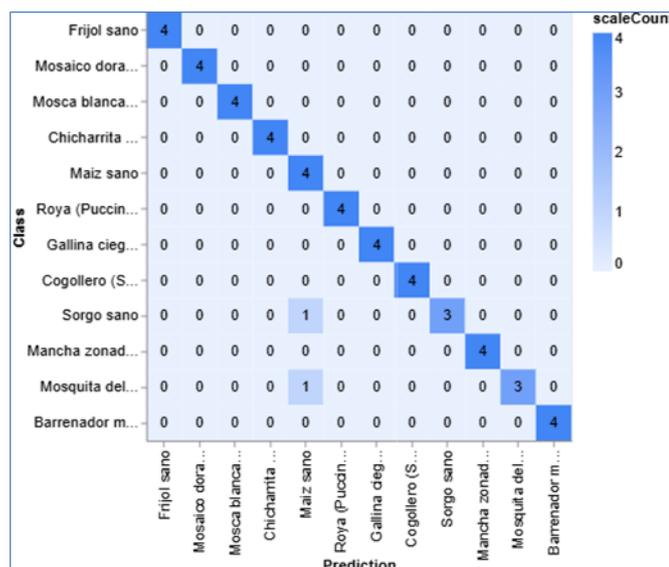
El modelo utilizó 4 muestras por clase para la validación. De las 12 clases evaluadas, 10 clasificaron correctamente todas las muestras, sin embargo, las clases “Sorgo sano” y “Mosquita del sorgo” presentaron errores con una muestra al predecirla como “Maíz sano”. En este caso la precisión fue de 0.75 para las dos clases con predicción incorrecta.

Se identificaron en la matriz de confusión valores incorrectos correspondientes a las clases “Sorgo sano” y “Mosquita del sorgo” obtenida producto del entrenamiento:

- El modelo clasificó una muestra como “Maíz sano”, pero pertenece a “Sorgo sano”, la precisión para “Sorgo sano” es de 0.75.

**Figura 4.**

Matriz de confusión



Nota. Resultado de entrenamiento en Google Teachable Machine

- El modelo clasificó una muestra como “Maíz sano”, pero pertenece a plaga “Mosquita del sorgo”, la precisión para “Mosquita del sorgo” es de 0.75.

La tabla 4, muestra el resultado de precisión del modelo por clase, según datos obtenidos de matriz de confusión.

**Tabla 4.**

Cálculo de precisión por clase

Métrica / Fórmula	Clases	Resultado precisión por clase
	1. Sorgo Sano	$Precisión = \frac{3}{3+1} = 0.75$
	2. Mosquita del sorgo	$Precisión = \frac{3}{3+1} = 0.75$
	3. Frijol sano	
	4. Mosaico dorado	
	5. Mosca blanca	
	6. Chicharrita del maíz	
	7. Maíz sano	$Precisión = \frac{4}{4+0} = 1$
	8. Roya	
	9. Gallina ciega	
	10. Cogollero	
	11. Mancha zonada	
	12. Barrenador mayor de tallo alto	

**Tabla 5.**

Cálculo de exactitud del modelo

Métrica / Fórmula	Accuracy (Exactitud) del modelo
$Exactitud = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN}$	$Exactitud = \frac{4 + 4 + 4 + 3 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 3}{4 + 4 + 4 + 3 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 3 + 1 + 1} = 0.958$

Se dividen los verdaderos positivos (VP) entre la suma de los VP y los Falsos Positivos (FP).

De acuerdo a los datos facilitados por la matriz de confusión, se calculó la exactitud (Accuracy) del modelo al realizar las clasificaciones de las muestras, esta métrica corresponde a la proporción de predicciones correctas tanto positivas como negativas. El modelo alcanzó 0.958 de exactitud al clasificar muestras de las clases etiquetadas, en la tabla 5 se muestra el cálculo correspondiente.

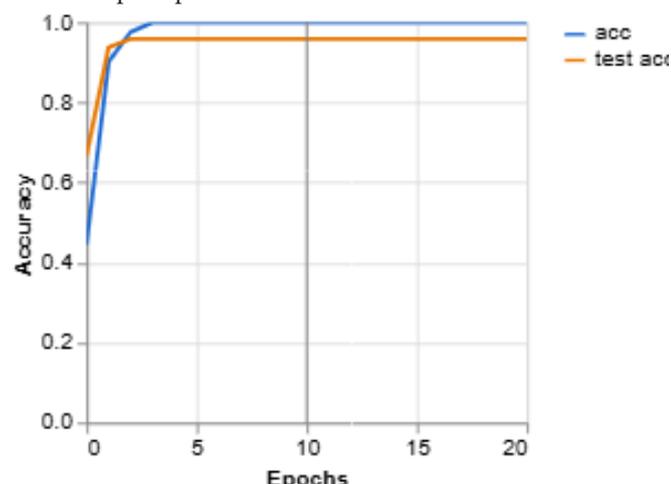
La precisión por época del modelo entrenado, obtenida en Google Teachable Machine se puede corroborar en la gráfica mostrada en la figura 5, la línea naranja indica la precisión al realizar las pruebas de validación, esta línea se acerca ligeramente a precisión 1.

### 3.1.1 RESULTADOS DE PRUEBA PARA MODELO CON PRECISIÓN 1

En la fase de prueba, cuando se alcanzó precisión 1 en todas las clases, el modelo fue evaluado con nuevos datos. Los resultados mostraron variaciones en la precisión dependiendo de la familiaridad del modelo con las clases, la figura 6 muestra prueba realizada con una imagen de la plaga “falsa mancha angular del frijol”, para la cual no se incluyeron datos en el modelo. Se obtuvo la siguiente respuesta:

Figura 5.

Precisión por Época



Nota. Resultado de entrenamiento en Google Teachable Machine

Frijol sano: 45%,

Enfermedad Mosaico dorado: 19%, y

Plaga "Mosca blanca" 26%.

Estos datos indican que existe cierta similitud en las características de la imagen facilitada y las clases a las que el modelo les está asignando un valor. No obstante, la clase que corresponde a enfermedad "Roya", para la cual el modelo tenía datos de entrenamiento, alcanzó una precisión del 100%.

Aunque la precisión del modelo es de 1 en todas las clases, según los resultados obtenidos, se puede inferir que no ha aprendido las características generales de las clases, ya que no generaliza bien con nuevos datos. Es posible que haya memorizado los patrones de las imágenes utilizadas para el entrenamiento debido al pequeño conjunto de datos facilitados. Esto puede indicar que el modelo está sobreajustado; ha aprendido a clasificar las muestras de manera exhaustiva, impidiendo clasificar correctamente las muestras de prueba [24].

### 3.1.2 RESULTADOS DE PRUEBA PARA MODELO CON PRECISIÓN 0.958

Se realizaron pruebas con el modelo cuando obtuvo precisión de 0.75 para las clases "Sorgo sano" y "Mosquita del sorgo", se le proporcionaron imágenes de "Mosquita del sorgo" y "Sorgo sano" que no estaban incluidas en las muestras de entrenamiento (Figura 7). Los resultados fueron los siguientes:

- **Muestra de plaga Mosquita del sorgo:** 80% para "Sorgo Sano"

- **Muestra de Sorgo Sano:** 69 % para "Sorgo Sano" y 27% para "Maíz sano"

Aunque el modelo alcanzó una exactitud de 0.958 en general, como se puede apreciar en la figura 7, las clases que obtuvieron precisión 0.75 tienen dificultades al clasificar de forma correcta, esto puede estar asociado a la similitud de características que poseen las imágenes y al reducido conjunto de datos que ha utilizado el modelo para su entrenamiento.

Durante el proceso de prueba del modelo con imágenes nuevas para las clases "Mosca blanca" y "Gallina ciega" quienes alcanzaron precisión de 1 durante el entrenamiento (figura 8), se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Muestra de "Mosca blanca":** 93% Mosca blanca
- **Muestra de "Gallina ciega":** 99% Gallina ciega

Para las clases que alcanzaron precisión 1 durante el entrenamiento del modelo, al mostrarles nuevos datos responden de forma acertada a la predicción, logrando más del 90% de exactitud, acercándose a la precisión general de 0.958 obtenida en el modelo.

Al finalizar el proceso de entrenamiento del modelo para este proyecto, se exportó en formato TensorFlow Lite, lo que permitió su implementación en la aplicación móvil. Incorporar Machine Learning como herramienta tecnológica en el sector agrícola, facilita de forma directa en el campo la identificación temprana de plagas y enfermedades optimizando el proceso de monitoreo y control de las mismas.

Por otra parte, la implementación del patrón MVC en la arquitectura de la aplicación permitió una clara separación de las responsabilidades, apartar los datos de la aplicación, la interfaz de usuario y la lógica de negocios, facilita el mantenimiento y la extensibilidad del software por parte del equipo de trabajo [25]. Por tal razón, dentro del Modelo se incluyeron las clases en lenguaje Java, que permiten la representación de los datos, en la Vista se ubicaron todas las interfaces, en Android se definen como Layout. En el Controlador se incorporaron Actividades (Activity) y Fragmentos (Fragment) que gestionan la interacción del usuario entre el Modelo y la Vista. A la estructura del proyecto Android se incorporó una carpeta ML que contiene el modelo entrenado para el reconocimiento de plagas y enfermedades que utiliza la aplicación.

### 3.1. DISCUSIÓN

Estudios similares que utilizan Red Neuronal Convulsional (CNN) demuestran un alto porcentaje de precisión en el proceso de clasificación de imágenes referente a cultivos afectados por plagas o enfermedades, en este sentido, se ha observado resultados de algoritmo implementado utilizando Red Neuronal Convulsional Modificada (ModCNN) para la detección de enfermedad enro-

llamamiento en hojas de cultivo de tomates y virus mosaico dorado en cultivo de frijol, para los cuales utilizaron 596 imágenes de hojas de frijol (213 sanas y 283 enfermas) y 447 imágenes de tomate (302 sanas y 145 enfermas) alcanzando durante el proceso de prueba una precisión de 0.9769, esto demuestra la robustez de este tipo de tecnologías y el aporte significativo que ofrecen al sector agropecuario [5].

Otro estudio sobre clasificación de imágenes para la predicción de enfermedades en hojas del cultivo de arroz utilizando Redes Neuronales Convulsionales (CNN) ha obtenido 95.83 de precisión al realizar validaciones con datos obtenidos del directorio de aprendizaje automático de UCI (Machine Learning Repository / Universidad de California en Irvine), este modelo entrenado se ha incorporado a una interfaz gráfica para ser utilizado por agricultores como usuarios finales [7].

De igual forma, la implementación en Tensorflow de algoritmo con modelo entrenado para detectar plaga mosca blanca en cultivos de hortalizas obtuvo resultados entre 0.81 y 0.94 de precisión, en las distintas pruebas realizadas lo que indica que el algoritmo tiene un alto porcentaje de precisión [6].

Para el proyecto abordado en este artículo se ha utilizado Google Teachable Machine que implementa CNN para la clasificación de imágenes, el modelo entrenado para que identifique plagas y enfermedades en cultivos de maíz, frijol y sorgo ha obtenido una precisión de 0.958, en comparación con modelos similares (tabla 6) se observa que, el modelo con Modificación de Redes Neuronales Convulsionales (ModCNN) alcanzó el valor más alto de precisión, cabe mencionar que el conjunto de datos utilizados en ese proyecto es superior al estudio aquí realizado.

Machine Learning destaca como una tecnología versátil debido a que puede ser aplicada en diferentes sectores y permite desarrollar para cada problema un algoritmo de predicción para un caso de uso particular. Lo interesante de estos algoritmos es que aprenden de los datos con la finalidad de encontrar patrones o tendencias para comprender qué nos dicen estos datos y, a partir de ellos, se construye un modelo que es capaz de predecir o clasificar los elementos. Sin embargo, existen factores relevantes para el buen desempeño del modelo, que se refieren a la calidad y disponibilidad de los datos, el algoritmo puede ser potente, pero no es suficiente si no se le facilitan los datos indicados para entrenarlo [12].

En este estudio se ha identificado como limitante la cantidad de datos reducida utilizada para el entrenamiento del modelo y se requiere un conjunto de datos más amplio de al menos 600 imágenes a más por clase para que pueda generalizar bien con datos nuevos como ha sido comprobado por [5] con ModCNN, para mejorar el rendimiento del modelo, se recolectarán nuevas muestras por clases (cultivos sanos y enfermos) bajo la asesoría de agricultores y técnicos de campo, de igual forma

se indagará a cerca del acceso a repositorios de Machine Learning para fortalecer el modelo con datos suficientes, como lo hizo [7] con el proyecto que predice enfermedades en hojas del cultivo de arroz utilizando CNN.

Para reducir el sobreajuste de modelo entrenado, [26] sugiere mejorar la cantidad y calidad de los datos de entrenamiento aplicando métodos comúnmente utilizados, como la transformación de traslación y rotación de las imágenes, se considerará como una acción importante a tomar en cuenta para la optimización de modelo entrenado.

La tecnificación y el control integrado de plagas y enfermedades, contribuye a la producción y productividad del cultivo de maíz [27], aspectos que también pueden aplicarse a otros cultivos básicos. Por ello, utilizar modelo de aprendizaje automático en una aplicación móvil, para identificar daños causados por plagas y enfermedades en los cultivos es una buena estrategia, debido a que, es una tecnología que permiten agilizar el reconocimiento de imágenes correspondiente a afectaciones, de esta forma la atención y el manejo a problemas puede tratarse en fases iniciales, evitar que se extienda y compartir información al respecto con la comunidad, asimismo se minimizan los daños y se contribuye al buen rendimiento de los cultivos.

Incorporar tecnologías en el desarrollo de actividades agrícolas facilita el trabajo y mejora la productividad, sin embargo, la presencia de recurso humano con conocimientos técnicos sigue siendo valioso para asegurar la aplicación adecuada y oportuna.

#### 4. CONCLUSIONES

Los requerimientos relevantes para este proyecto se detallan en 3 historias de usuarios prioritarias ubicadas en un Sprint, este generó un entregable terminado con el modelo entrenado en Google Teachable Machine para detección de plagas y enfermedades específicas en cultivos de maíz, frijol y sorgo.

El modelo entrenado con 252 imágenes como prueba piloto, se incorporó en la aplicación móvil utilizando TensorFlow Lite, en función de facilitar el trabajo a agricultores y técnicos de campo que cosechan, supervisan y ejecutan acciones para controlar el deterioro en cultivos provocados por plagas y enfermedades.

La precisión general alcanzada del modelo es de 0.958 en la detección de plagas y enfermedades de cultivos de maíz, frijol y sorgo, influye en el resultado la forma de capturar la imagen, capacidad de la cámara del dispositivo y la variedad de imágenes que dispone el modelo para clasificar.

El patrón MVC utilizado para estructurar la aplicación permitió obtener una arquitectura organizada, escalable y de fácil manejo del código, aplicar patrones de

diseño y arquitectónicos constituye una buena práctica de programación.

A pesar de que el aprendizaje automático es un buen aliado para solventar problemas en el sector agrícola, aún existen muchos retos por superar, como, la aceptación y disponibilidad de nuevas tecnologías por parte de los agricultores, la adquisición de recursos necesarios para su implementación, la clasificación, calidad y cantidad de imágenes que se debe proveerse al modelo para que los resultados sean acertados.

Es importante mencionar que, las aplicaciones desarrolladas para detectar daños en cultivos con Machine Learning deben ser utilizadas por personas que se enfrentan de forma cotidiana a estas dificultades, ellos son los que pueden validar el verdadero aporte de estas. Aunque este tipo de tecnologías facilita la identificación temprana de plagas y enfermedades. El acompañamiento de los técnicos de campo siempre será importante y se debe tomar en cuenta sus recomendaciones.

## REFERENCIAS

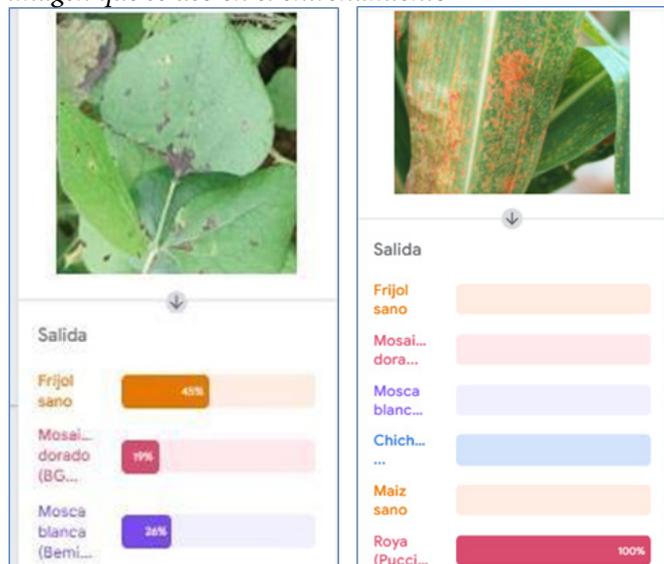
- [1] O. F. C. Martinez, «Situación del cultivo de maíz en Guatemala: principales limitaciones en la productividad», *ACI Av. En Cienc. E Ing.*, vol. 14, n.º 1, Art. n.º 1, abr. 2022, doi: 10.18272/aci.v14i1.2596.
- [2] N. C. Eli-Chukwu, «Applications of Artificial Intelligence in Agriculture: A Review», *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, n.º 4, Art. n.º 4, ago. 2019, doi: 10.48084/etasr.2756.
- [3] FAO, «La FAO acoge con satisfacción la decisión de conmemorar cada año el Día Internacional de la Sanidad Vegetal el 12 de mayo», Newsroom. Accedido: 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/uiuR5M>
- [4] R. R. Hernández, «La Agricultura de Precisión. Una necesidad actual», *Ing. Agríc.*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, 2021, Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586269368010>
- [5] F. Nihar, N. N. Khanom, S. S. Hassan, y A. K. Das, «Plant Disease Detection through the Implementation of Diversified and Modified Neural Network Algorithms», *J. Eng. Adv.*, vol. 2, n.º 01, pp. 48-57, mar. 2021, doi: 10.38032/jea.2021.01.007.
- [6] O. López Gorozabel, R. Malla Valdiviezo, G. Morejón López, y M. León Bravo, «Sistema de detección de plagas en los cultivos», *593 Digit. Publ. CEIT*, vol. 9, n.º 1, pp. 128-137, 2024, Accedido: 10 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9262986>
- [7] B. Paneru, B. Paneru, y K. B. Shah, «Analysis of Convolutional Neural Network-based Image Classifications: A Multi-Featured Application for Rice Leaf Disease Prediction and Recommendations for Farmers», 17 de septiembre de 2024, *arXiv: arXiv:2410.01827*. doi: 10.48550/arXiv.2410.01827.
- [8] A. Flores, «INTA presenta nuevas variedades de sorgo rojo de alta calidad industrial», *El 19 Digital*. Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3rB7iB5>
- [9] Hernández-Sampieri, Roberto y Mendoza Torres, Christian Paulina, *Metodología de la Investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGRAW-HILL, 2018.
- [10] «Android Studio», Android Developers. Accedido: 26 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/JMuOhb>
- [11] J. Sánchez Allende, *Java 2: iniciación y referencia*. McGraw-Hill España, 2005. Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/unanmanagua/50290?page=20>
- [12] J. Torres, *Python Deep Learning: Introducción práctica con Keras y TensorFlow 2*. Alpha Editorial, 2020.
- [13] Google, «Teachable Machine». Accedido: 8 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://teachablemachine.withgoogle.com/>
- [14] Google, «TensorFlow Lite», TensorFlow. Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tensorflow.org/lite/guide?hl=es-419>
- [15] Google Cloud, «Bases de datos de Google Cloud», Google Cloud. Accedido: 10 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/dyoTk5>
- [16] M. Carney *et al.*, «Teachable Machine: Approachable Web-Based Tool for Exploring Machine Learning Classification», en *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, en CHI EA '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, abr. 2020, pp. 1-8. doi: 10.1145/3334480.3382839.
- [17] D. Agustian, P. P. G. P. Pertama, P. N. Crisnapati, y P. D. Novayanti, «Implementation of Machine Learning Using Google's Teachable Machine Based on Android», en *2021 3rd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS)*, oct. 2021, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICORIS52787.2021.9649528.
- [18] «Umbrales y matriz de confusión | Machine Learning | Google for Developers». Accedido: 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/UB-PrcS>
- [19] K. S. & J. Sutherland, «La Guía Definitiva de Scrum: Las Reglas del Juego», nov. 2020, Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uvm.edu.ve/handle/123456789/59>
- [20] J. M. V. Gertrudix, *Java 17 Programación Avanzada*. Rama Editorial, 2022.
- [21] D. S. Menchaca, «Calidad en la especificación de requerimientos de software aplicado en metodologías ágiles», *INF-FCPN-PGI Rev. PGI*, pp. 61-64, nov. 2021, Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://ojs.umsa.bo/ojs/index.php/inf\\_fcpn\\_pgi/article/view/49](https://ojs.umsa.bo/ojs/index.php/inf_fcpn_pgi/article/view/49)

- [22] R. Herranz, *Despegar con Scrum*. Lulu.com, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/ZqhItg>
- [23] E. A. U. Malahina, R. P. Hadjon, y F. Y. Bisilisin, «Teachable Machine: Real-Time Attendance of Students Based on Open Source System», *IJICS Int. J. Inform. Comput. Sci.*, vol. 6, n.º 3, Art. n.º 3, nov. 2022, doi: 10.30865/ijics.v6i3.4928.
- [24] Google, «Glosario sobre aprendizaje automático | Machine Learning | Google for Developers». Accedido: 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/saYFPI>
- [25] «Marco de Trabajo para Seleccionar un Patrón Arquitectónico en el Desarrollo de Software». Accedido: 1 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/2670>
- [26] Jiang Huixian, «The Analysis of Plants Image Recognition Based on Deep Learning and Artificial Neural Network | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore», vol. 8. Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9062591/similar#similar>
- [27] M. Caviedes-Cepeda, F. Carvajal-Larenas, y J. L. Zambrano-Mendoza, «Generación de tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*. L) en el Ecuador», *ACI Av. En Cienc. E Ing.*, vol. 14, n.º 1, Art. n.º 1, abr. 2022, doi: 10.18272/aci.v14i1.2588.
- [28] Tecnológico Nacional, «Manual Granos Básicos opt. pdf». Accedido: 9 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.tecnacional.edu.ni/media/Manual\\_Granos\\_B%C3%A1sicos\\_opt.pdf](https://www.tecnacional.edu.ni/media/Manual_Granos_B%C3%A1sicos_opt.pdf)

## ANEXOS A

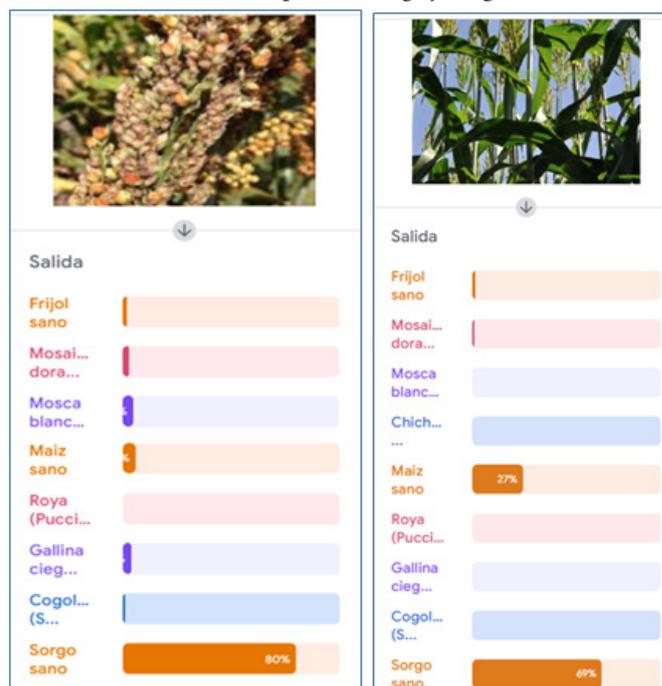
**Figura 6.**

*Predicción con imagen que no se usó / Predicción con imagen que se usó en el entrenamiento*



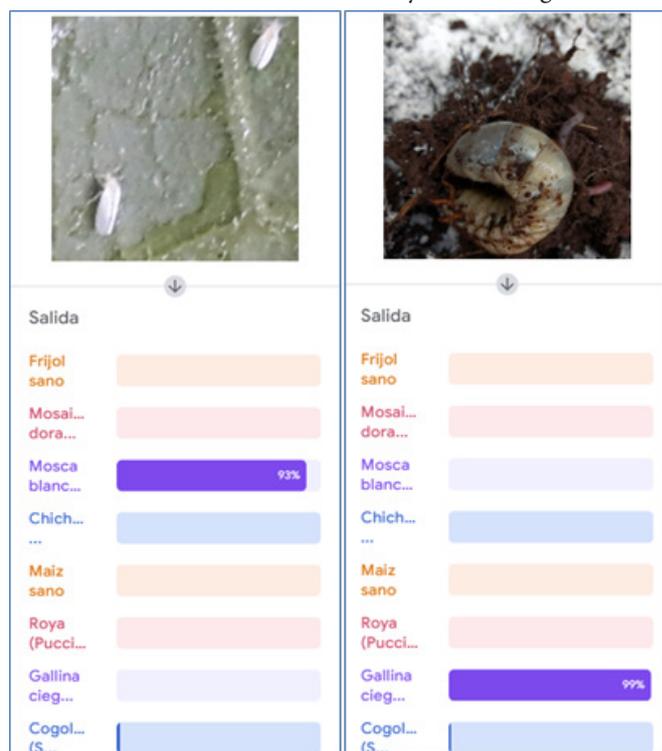
**Figura 7.**

*Predicción errónea de Mosquita del sorgo y Sorgo sano*



**Figura 8.**

*Predicción correcta de Mosca blanca y Gallina ciega*



## ANEXOS B

Tabla 2.

Afectaciones de plagas y enfermedades en cultivos

Clasificación	Nombres	Afectaciones en cultivos.
Enfermedad	Mosaico dorado (BGYMV)	Las hojas tienen un moteado de tonos amarillos, con venas más blancas de lo normal.
	Roya (Puccinia sorghi)	Pústulas alargadas de color herrumbroso oscuro, pústulas oscuras casi negras, presentes en el haz y envés de la hoja, solo presente en hojas.
	Mancha zonada (Gloeocercospora sorghi)	Lesiones elípticas y largas de color café claro en el centro con márgenes oscuras. Cuando la infestación es severa el área foliar queda con una apariencia quemada.
Plagas	Mosca blanca (Bemisia tabaci)	Hojas se muestran amarillas. Aparece un insecto pequeño de color blanco sobre las hojas del cultivo.
	Chicharrita verde (Empoasca kraemer)	Lesiones en las hojas, se desarrolla el hongo negro cubre la hoja. Insecto diminuto, de color verde en el cultivo.
	Gallina ciega (Phyllophaga sp)	Larvas blancas en las raíces del cultivo, afecta desarrollo de la planta. En etapa adulta es un escarabajo de color oscuro.
	Cogollero (Spodoptera frugiperda)	Raspadura de la epidermis en las hojas, agujeros grandes e irregulares, excrementos como huella. Larvas verde o café / en etapa adulta es polilla de hojas café.
	Mosquita del sorgo (Contarinia sorghicola)	Hojas enrolladas, floración y granos en formación afectados. Larvas amarillas / etapa adulta mosca pequeña con alas transparentes.
	Barrenador mayor del tallo (Diatraea saccharalis)	Tejidos de las plantas, cogollo y vaina de hojas carcomidos. Larvas amarillo claro / etapa adulta larva con alas café claro.

Nota. Información obtenida de Tecnológico Nacional [28]

Tabla 6.

Comparación de métodos utilizados y precisión obtenida de estudios relacionados

Referencia	Tecnologías / Métodos	Datos	Precisión de prueba
[5]	ModCNN	Tomate y Frijol	0.9769
[7]	CNN	Arroz	0.9583
[6]	Tensorflow /CNN	Hortaliza	0.81 - 0.94



# REVISTA INGENIO

## Análisis Cuantitativo y Cualitativo de las Diferencias en la Incidencia de Lesiones por Accidentes de Trabajo en la Construcción: Un Estudio Comparativo entre las Provincias de Guayas y Pichincha en Ecuador, 2014-2023

### Quantitative and Qualitative Analysis of Differences in Work-Related Injury Incidence in Construction: A Comparative Study between the Guayas and Pichincha Provinces in Ecuador, 2014-2023

Antonio Ramón Gómez-García |  Universidad Espíritu Santo - UEES, Guayaquil, Ecuador  
Francisco Luis Rivas Flor |  Universidad Espíritu Santo - UEES, Guayaquil, Ecuador

Recibido: 15/8/2024  
Recibido tras revisión: 30/9/2024  
Aceptado: 18/10/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Lesiones, construcción, heterogeneidad, factores determinantes.

#### KEY WORDS

Injuries, construction, heterogeneity, determinants.

#### RESUMEN

Las lesiones por accidentes de trabajo siguen siendo un problema significativo en el sector de la construcción en Ecuador, especialmente en provincias con alta actividad urbanística y población laboral. Esta investigación busca identificar las causas de las diferencias en la incidencia de accidentes entre Guayas y Pichincha. Utilizando datos de 2014 a 2023, se calcularon las tasas de incidencia estandarizadas por edad (ASIR) y la razón de tasas (IRR). Además, se diseñó y aplicó un cuestionario para explorar las diferencias entre expertos (U de Mann-Whitney - Índice Kappa de Cohen). Los resultados muestran que Guayas presenta ASIRs más altas y el doble de IRR en comparación con Pichincha. Los expertos de Guayas identificaron factores a nivel macro como predominantes, mientras que en Pichincha se enfocaron en factores micro. No se encontraron diferencias significativas a nivel meso. Las disparidades podrían deberse a la aplicación desigual de normativas y actitudes culturales hacia la seguridad. Se sugiere mejorar la inspección laboral en Guayas y realizar estudios nacionales para una comprensión más amplia.

#### ABSTRACT

Workplace injuries remain a significant issue in the construction sector in Ecuador, particularly in provinces with high urban development and workforce populations. This study aims to identify the factors contributing to differences in accident incidence between Guayas and Pichincha. Using administrative data from 2014 to 2023, age-standardized incidence rates (ASIR) and incidence rate ratios (IRR) were calculated. Additionally, a questionnaire was designed and administered to explore differences among experts (Mann-Whitney U test and Cohen's Kappa index). The analysis revealed that Guayas consistently had higher ASIRs and twice the IRR compared to Pichincha. Experts from Guayas highlighted macro-level factors as primary, whereas those from Pichincha emphasized micro-level factors, with no significant differences at the meso level. These differences may be attributed to uneven enforcement of regulations and cultural attitudes toward safety. It is recommended to enhance labor inspections in Guayas and conduct nationwide research for a deeper understanding.

## I. INTRODUCCIÓN

Las lesiones mortales y no mortales por accidentes de trabajo siguen constituyendo un problema de salud laboral que requiere atención prioritaria debido a sus elevados costos sociales y económicos [1]. En 2019, las estimaciones globales, regionales y nacionales sobre la carga de enfermedades y accidentes relacionados con el trabajo indicaron que se produjeron aproximadamente 374 millones de lesiones no mortales y 350.000 lesiones mortales. Estos accidentes de trabajo representaron cer-

ca del 6% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial en pérdidas económicas [2].

Entre los lugares de trabajo más peligrosos con una alta frecuencia y probabilidad de sufrir lesiones se encuentra el sector de la construcción [3-5]. En países de la Unión Europea, el sector de la construcción representó el 22,5% de lesiones no mortales y el 12,9% de las lesiones mortales del total de accidentes de trabajo entre 2012 y 2018 [6]. Situación similar se ha observado en otras

regiones. Por ejemplo, el sector de la construcción en Japón y Estados Unidos también destaca por presentar esta problemática [7]. En consecuencia, el riesgo de sufrir lesiones en el sector de la construcción es considerablemente mayor en comparación con otros sectores económicos, con una probabilidad 2,5 veces superior en lesiones no mortales y 5 veces más en lesiones mortales [8].

Además de las múltiples causas que contribuyen a la ocurrencia de los accidentes de trabajo en el sector de la construcción [9], existen otros determinantes que podrían desempeñar un papel significativo. Se ha constatado que las características culturales, determinadas por la ubicación geográfica, influyen en el grado de cumplimiento legal y en la asignación de recursos para la gestión preventiva de los accidentes de trabajo [10]. Asimismo, se ha evidenciado que la cultura regional puede modificar la percepción del riesgo que tienen los trabajadores frente a los diversos peligros presentes en las obras de construcción [11].

La República del Ecuador (en adelante, Ecuador) no solo cuenta con una legislación general destinada a garantizar condiciones seguras y saludables para los trabajadores, sino que también dispone de normativa específica que detalla las obligaciones del empleador para la protección frente a los riesgos en obras de construcción [12]. De acuerdo con la información publicada en la página web del Seguro General de Riesgos del Trabajo [13], entre 2014 y 2023 se calificaron un total 161.540 accidentes de trabajo en el país, de los cuales 99.836 sucedieron en el centro o lugar habitual de trabajo. Dentro de estos, 6.071 accidentes se concentraron en el sector de la construcción. Las provincias de Guayas y Pichincha presentaron el mayor número, con 3.053 casos, lo que equivale al 50,3% del total de accidentes calificados en el centro o lugar habitual de trabajo para el sector de la construcción (ver Anexo A).

Según el Registro Estadístico de Empleo en la Seguridad Social [14], los trabajadores del sector de la construcción constituyeron el 3,4% (108.769) del total de afiliados a la seguridad social (3.236.447) entre 2014 y 2023. En conjunto, las provincias de Guayas y Pichincha concentraron el 75,9% de los trabajadores de este sector en el país (ver Anexo A). Desde la década de 2010, las principales ciudades de Guayas y Pichincha han experimentado un significativo crecimiento y desarrollo en sus proyectos urbanísticos [15]. Aunque la pandemia de COVID-19 detuvo temporalmente la ejecución de obras de construcción, se prevé una recuperación en los próximos años. Cabe mencionar que Guayas cuenta con una menor infraestructura gubernamental y supervisión por parte de las autoridades en temas relacionados con la seguridad y salud en el trabajo [16]. Además, la provincia de Guayas presenta peores indicadores socioeconómicos y niveles de pobreza en comparación con Pichincha [17].

En el país, diversos estudios han destacado la necesidad urgente de mejorar las medidas de seguridad para prevenir los accidentes de trabajo en obras de construcción, especialmente en las provincias de mayor prevalencia [18], [19]. No obstante, una de las limitaciones de los estudios mencionados es que se realizaron cálculos imprecisos para la comparación interprovincial, al basarse únicamente en el número total de accidentes de trabajo [12]. En su lugar, debieron utilizarse indicadores que consideraran la población expuesta de cada provincia como denominador (incidencia) para calcular de manera precisa las diferencias en la probabilidad de sufrir lesiones por accidentes de trabajo (riesgo relativo) [2].

Dado que las cifras absolutas dificultan la comparación entre regiones de un país [1] y considerando que la normativa de seguridad y salud en el trabajo es uniforme en todo el territorio nacional, nuestra hipótesis inicial plantea homogeneidad en la incidencia de accidentes de trabajo entre regiones. Este estudio tiene como objetivo comparar la incidencia de accidentes de trabajo en el sector de la construcción entre las provincias de Guayas y Pichincha. Si se rechaza la hipótesis planteada sobre la heterogeneidad entre provincias, se procederá, como objetivo secundario, a consultar a expertos nacionales para valorar los componentes culturales que podrían explicar las diferencias observadas.

## 2. MÉTODOS

Estudio de enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo) de carácter longitudinal (2014-2023) que emplea datos procedentes de los registros administrativos para el sector de la construcción en Ecuador. Por un lado, el número de calificaciones de lesiones mortales y no mortales ocurridas en el lugar de trabajo [13]. Por otro, el número de trabajadores afiliados a la seguridad social a mitad de año [14]. Ambas fuentes de datos son gestionadas por el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social. El periodo de 10 años se justifica por la disponibilidad de datos y, como se ha señalado anteriormente, solo incluyeron las provincias de Guayas y Pichincha.

Siguiendo las recomendaciones internacionales [1], se calcularon las tasas de incidencia estandarizadas por edad (ASIRs) por cada 1.000 (ver Anexo B, ecuación 1). Esto permitió analizar la evolución y el comportamiento en ambas provincias mediante una regresión lineal simple (ver Anexo B, ecuación 2). Para evaluar el exceso de riesgo de Guayas en comparación con Pichincha (referencia), se calcularon la razón de tasa de incidencia anuales (IRR) y sus intervalos de confianza del 95% (IC95%), con una significación estadística del 0,05 (ver Anexo B, ecuación 3).

Al constatarse diferencias interprovinciales (ver 3. Resultados), se consultó a un grupo de expertos en obras de construcción de ambas provincias para una mejor comprensión: Guayas (8 expertos) y Pichincha (8 expertos).

Los expertos contaban con más de 5 años de experiencia en la ejecución de proyectos de construcción, además de formación universitaria de tercer y cuarto nivel en seguridad y salud ocupacional. Los expertos fueron informados sobre el objetivo del estudio y participaron de manera voluntaria. Se diseñó un cuestionario basado en la clasificación de los componentes determinantes de la ocurrencia de los accidentes de trabajo propuesto por Landeweerd y colaboradores [20], y se complementó con las evidencias más recientes en la literatura científica para el sector de la construcción [5, 21-23].

El cuestionario incluyó tres preguntas estructuradas a nivel macro (la ausencia de la inspección de trabajo para verificar el cumplimiento de la normativa), nivel meso (la limitada capacidad económica de la organización para la implementación de medidas preventivas) y nivel micro (el comportamiento o actitud insegura de los trabajadores frente al riesgo). A cada experto se le solicitó valorar, por orden descendente de importancia (1 = muy determinante, 2 = determinante y 3 = poco determinante) el nivel más influyente sobre la ocurrencia de los accidentes de trabajo (ver Anexo C). Se compararon las diferencias de medianas de las puntuaciones en las respuestas para cada una de las preguntas mediante la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney y la concordancia entre expertos con el Índice Kappa de Cohen (ver Anexo B, ecuación 4). El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el programa JAMOVI para Macintosh (versión 2.3.21.0) y Microsoft Excel (versión 16.77) para la representación de las figuras.

### 3. RESULTADOS

Un 97% de las lesiones por accidentes de trabajo correspondieron a hombres. En ambas provincias se observan reducciones en el número de trabajadores afiliados y de lesiones en los centros de trabajo del sector de la construcción en el período de 2014 a 2023. Durante los años de la pandemia de la COVID-19 (2020 y 2021) se observaron reducciones sustanciales respecto a 2019, para luego incrementarse levemente en los siguientes dos años (ver Anexo A).

En general, las tasas crudas de incidencia anuales por accidentes de trabajo en Ecuador mostraron una tendencia decreciente entre 2014 y 2018 (pendiente =  $-2,03$ ), disminuyendo de 10,18 (IC95% = 9,68–10,71) a 3,17 (IC95% = 2,86–3,53). Sin embargo, en los años posteriores mostró una ligera tendencia creciente (pendiente =  $0,18$ ). Un patrón similar se observa en las ASIRs para cada una de las provincias (ver Figura 1.1). A pesar de ello, la provincia de Guayas ha mantenido cifras superiores en comparación con Pichincha a lo largo de todo el período analizado y que se constata al calcular la IRR.

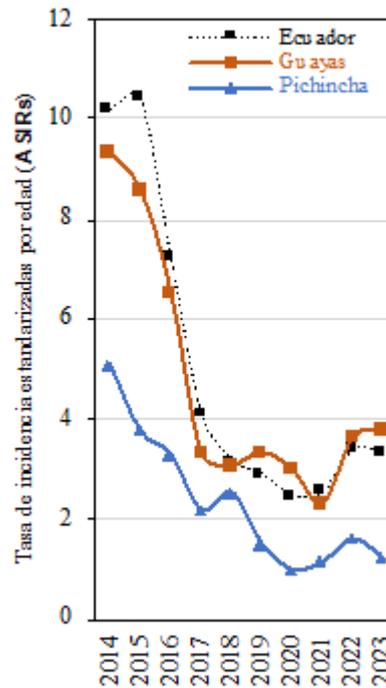
La provincia de Guayas, en comparación con Pichincha (referencia), ha presentado un exceso de riesgo de

lesiones por accidentes de trabajo 2 veces más durante el período de análisis (ver Figura 1.2), exceptuando el año 2018: IRR = 1,22 (0,93–1,59);  $p = 0,144$ . Desde el inicio hasta el final del período, el exceso de riesgo de lesiones por accidentes de trabajo entre las dos provincias ha experimentado un aumento significativo. En 2014, la IRR era de 1,83 (IC 95%: 1,60–2,10;  $p \leq 0,05$ ), mientras que en 2023 se elevó a 3,13 (IC 95%: 2,20–4,46;  $p \leq 0,05$ ).

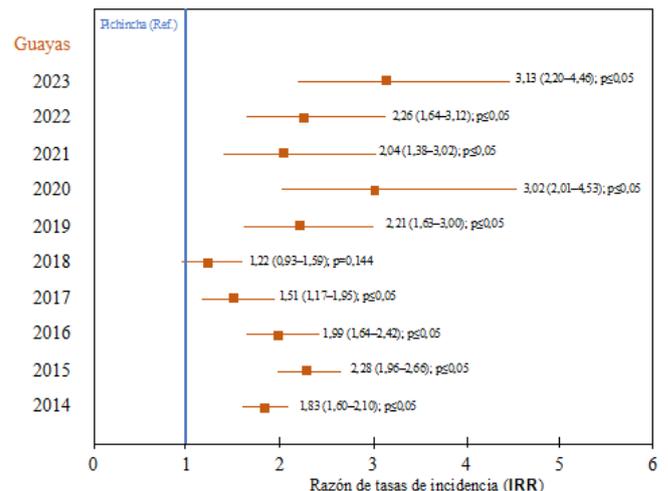
**Figura 1.**

ASIR y IRR de lesiones por accidentes en el centro de trabajo en el sector construcción en Ecuador: 2014-2023.

**1.1**



**1.2**



Los resultados del cuestionario (ver Anexo C) revelan diferencias estadísticamente significativas y una falta de concordancia entre los expertos de las dos provincias para las respuestas 1 y 3 (ver Tabla 1), lo que sugiere variaciones en las percepciones entre los expertos. Por un lado, los

**Tabla 1.**

Diferencias y concordancia de las puntuaciones (medianas) del cuestionario entre grupos de expertos de Guayas y Pichincha.

	<b>Respuesta 1 (Nivel macro)</b>	<b>P</b>	<b>Respuesta 2 (Nivel meso)</b>	<b>P</b>	<b>Respuesta 3 (Nivel micro)</b>	<b>P</b>
Pichincha	3	0,004	2	0,052	1	0,017
Guayas	1		2		3	
Kappa	0,02	0,686	-0,10	0,408	0,06	0,662

Nota: 1 = Muy determinante, 2 = Determinante, 3 = Poco determinante.

expertos de Guayas declararon el nivel macro (Respuesta 1) como el factor más influyente en la ocurrencia de accidentes de trabajo ( $k = 0,02$ ;  $p = 0,686$ ), mientras que los expertos de Pichincha destacaron el nivel micro (Respuesta 3) como el más determinante ( $k = 0,06$ ;  $p = 0,662$ ). Aunque para el nivel meso (Respuesta 2), no se encontraron diferencias significativas ( $p = 0,052$ ) entre los expertos de Guayas y Pichincha, la concordancia fue muy baja ( $k = -0,10$ ;  $p = 0,408$ ).

### 3.1. DISCUSIÓN

La tasa de accidentes de trabajo en el sector de la construcción muestra variabilidad según las regiones, aunque continúa siendo uno de los sectores económicos más peligrosos, con una alta incidencia de lesiones mortales y no mortales [2].

En Ecuador, la disminución y estabilidad en la tasa de accidentes de trabajo puede atribuirse a diversas causas. Aunque no es el objetivo principal de este estudio, es probable que los avances tecnológicos en los procesos constructivos hayan influido en el comportamiento temporal a la disminución durante el periodo analizado (2014-2023). Sin embargo, un hecho que influye en el resultado del cálculo de las ASIRs es el descenso progresivo en el número de trabajadores afiliados (denominador) al sector de la construcción, observado desde 2016 en la provincia de Guayas y desde 2019 en la provincia de Pichincha [14].

De igual modo, se habría esperado una reducción substancial en las tasas de accidentes en 2020 debido a la paralización de muchos proyectos de construcción por las restricciones de movilidad y confinamiento relacionadas con la COVID-19 [24]. No obstante, tanto en Guayas como en Pichincha, las cifras se mantuvieron similares a las de 2019. A continuación, se explican las discrepancias y la falta de concordancia entre los expertos de ambas provincias en cuanto a los factores determinantes de los accidentes de trabajo.

Primero, en discrepancia con Pichincha, los expertos de Guayas consideran que la ausencia de la inspección de trabajo para verificar el cumplimiento de las normativas

en las obras de construcción es un factor muy determinante (Respuesta 1, Nivel macro). En un estudio previo [16], se identificaron diferencias en la distribución de inspectores laborales por cada 10.000 trabajadores: 0,3 en Guayas y 0,6 en Pichincha. Además de la necesidad de contrarrestar el déficit en la ratio de inspectores según las recomendaciones internacionales [1], [25], un criterio a tomar en cuenta consistiría en la concentración de más inspectores en aquellas regiones con mayores tasas de incidencia por accidentes de trabajo, lo que podría contribuir a que las empresas de la construcción mejoren la gestión de la seguridad y salud en los lugares de trabajo [26], [27].

Segundo, los expertos de Guayas consideran como factor poco determinante el comportamiento o actitud de los trabajadores frente a factores de riesgo (Respuesta 3, Nivel micro). Sin embargo, la mayoría de los estudios han demostrado que hasta el 80% de los accidentes de trabajo en obras de construcción son como consecuencia de los comportamientos inseguros [28]. No usar equipo de protección de personal, manejar herramientas o maquinaria de manera inadecuada y el incumplimiento de protocolos de seguridad son las principales causas de accidentes. Además, se ha demostrado que las características culturales específicas de cada región actúan como reguladores sociales en la conducta de seguridad de los trabajadores [4], [29]. Es posible que las diferencias culturales entre provincias puedan influir en cómo los trabajadores perciben los riesgos o cumplen las normas de seguridad.

En relación con la capacidad económica de las empresas de construcción para implementar medidas preventivas que reduzcan el riesgo de accidentes de trabajo (Respuesta 2, Nivel meso), los expertos de ambas provincias coinciden, aunque con resultados muy bajos. Las empresas constructoras a menudo no priorizan la inversión en la seguridad y salud de los trabajadores, considerándola como una necesidad secundaria de cumplimiento legal en lugar de una inversión crucial. Se estima un presupuesto del 1% del proyecto constructivo a la seguridad y salud [30]. Esta realidad es aún más evidente en las pequeñas empresas, cuyas limitaciones económicas restringen la adquisición de equipos de protección personal [31].

En 2023, de las 35.157 empresas de construcción en Ecuador, 30.521 eran microempresas (86,8%), concentrándose mayormente en Guayas y Pichincha con 16.018 (45,6% del total) [14]. Sería útil dar a conocer modelos de análisis costo-beneficio que demuestren que los beneficios de prevenir accidentes superan los costos en una relación de aproximadamente 3:1 [32].

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio, basado en datos secundarios del organismo ecuatoriano encargado de registrar los accidentes de trabajo, presenta limitaciones debido al subregistro y al empleo informal del sector de la construcción. Además, la falta de información detallada impidió la realización de análisis más específicos, como la identificación de las causas inmediatas y básicas de los accidentes, así como el desglose por ocupación y tamaño de empresa.

Dadas las múltiples variables que influyen en la ocurrencia de accidentes de trabajo en el sector de la construcción, resulta fundamental contar con información detallada sobre las herramientas y maquinaria, ya que su estado y mantenimiento son cruciales para la seguridad física del trabajador. Asimismo, la organización del trabajo, que incluye jornadas prolongadas y la exposición a condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas, representa otro aspecto importante a ser considerado. Además, los factores psicosociales, como el estrés laboral y la falta de comunicación efectiva por parte de los jefes de obra, pueden incrementar considerablemente la probabilidad de accidentes. Disponer de esta información facilitaría un análisis más detallado y sus resultados podrían ser empleados para una adecuada gestión para reducir la incidencia y fomentar ambientes de trabajo más seguros y saludables para todos los trabajadores del sector de la construcción.

No obstante, los resultados de este estudio son suficientes para evidenciar claramente las diferencias entre las provincias de Guayas y Pichincha. Además, sería muy oportuno llevar a cabo un estudio más amplio que incluyera a todas las provincias del Ecuador. Este enfoque permitiría obtener una visión más integral y precisa de la situación del sector de la construcción, facilitando la identificación de patrones, causas subyacentes y áreas prioritarias para la intervención. Al reunir datos de diversas regiones (provincias y cantones), se podría elaborar un marco de referencia más robusto para el desarrollo de políticas y estrategias de prevención para reducir los accidentes de trabajo en el país.

#### REFERENCIAS

- [1] International Labour Office. “Quick guide on sources and uses of statistics on occupational safety and health.” ILO Homepage | International Labour Organization. Accedido el 7 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ilo.org/media/392361/download>
- [2] J. Takala, P. Hämäläinen, R. Sauni, C. H. Nygård, D. Gagliardi y S. Neupane, “Global-, regional- and country-level estimates of the work-related burden of diseases and accidents in 2019”, *Scand. J. Work, Environ & Health*, noviembre de 2023. Accedido el 9 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.5271/sjweh.4132>
- [3] R. Dethlefsen, L. Orlik, M. Müller, A. K. Exadaktylos, S. M. Scholz, J. Klukowska-Rötzler y M. R. Ziaka, “Work-Related Injuries among Insured Construction Workers Presenting to a Swiss Adult Emergency Department: A Retrospective Study (2016–2020)”, *Int. J. Environmental Res. Public Health*, vol. 19, n.º 18, p. 11294, septiembre de 2022. Accedido el 17 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811294>
- [4] S. Jung, T. Kim, Y. Kim, Y. Kim, D. Kang y S. Kim, “Epidemiology of occupational injuries in construction workers between 2009 and 2018 in South Korea”, *Amer. J. Ind. Medicine*, noviembre de 2022. Accedido el 17 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/ajim.23448>
- [5] J. E. Doodoo y H. Al-Samarraie, “A systematic review of factors leading to occupational injuries and fatalities”, *J. Public Health*, enero de 2021. Accedido el 17 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s10389-020-01427-4>
- [6] European statistics on accidents at work (ESAW). “Accidents at work statistics - Statistics Explained”. European Commission. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/11539.pdf>
- [7] J. H. F. van Heerden, I. Musonda, C. S. Okoro y A. H. Alavi, “Health and safety implementation motivators in the South African construction industry”, *Cogent Eng.*, vol. 5, n.º 1, p. 1446253, enero de 2018. Accedido el 21 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446253>
- [8] Y. Shim, J. Jeong, J. Jeong, J. Lee y Y. Kim, “Comparative Analysis of the National Fatality Rate in Construction Industry Using Time-Series Approach and Equivalent Evaluation Conditions”, *Int. J. Environmental Res. Public Health*, vol. 19, n.º 4, p. 2312, febrero de 2022. Accedido el 28 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/ijerph19042312>
- [9] J. Johansson, L. Berglund, M. Johansson, M. Nygren, K. Rask, B. Samuelson y M. Stenberg, “Occupational safety in the construction industry”, *Work*, vol. 64, n.º 1, pp. 21-32, septiembre de 2019. Accedido el 2 de mayo de 2024.

2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3233/wor-192976>
- [10] M. H. Jaafar, K. Arifin, K. Aiyub, M. R. Razman, M. I. S. Ishak y M. S. Samsurijan, "Occupational safety and health management in the construction industry: a review", *Int. J. Occupational Saf. Ergonom.*, vol. 24, n.º 4, pp. 493-506, septiembre de 2017. Accedido el 9 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1366129>
- [11] K. G. Gómez-Bull, G. Ibarra-Mejía y M. M. Vargas-Salgado, "Risk perception in the construction industry: A literature review and future research directions", *Work*, pp. 1-12, junio de 2023. Accedido el 11 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3233/wor-220379>
- [12] A. R. Gómez García, "Comentario a la situación actual sobre las lesiones por accidentes de trabajo en el sector de la construcción del Ecuador", *INGENIO*, vol. 7, n.º 1, pp. 132-134, enero de 2024. Accedido el 16 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.29166/ingenio.v7i1.5787>
- [13] Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social. "Seguro General de Riesgos del Trabajo - Reporte de Accidentes de Trabajo". Accedido el 31 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGRhOGQyZWItOThhYS00MmE4LWI4ZWYtODVhMGFkOWM0MGI-0IiwidCI6IjZhNmNlOGVhLTBIMGYtNDY4YS05Yz-g1LWU3Y2U0ZjIjXzRmMiJ9>
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Censos. "Registro Estadístico de Empleo en la Seguridad Social". Accedido el 31 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYmNmYjdiMTYtO-DE3Mi00YjMyLW12NzAtYjIxZGRhZGMwOTIiIiwidCI6ImYxNThhMmU4LWNhZWMtNDQwNiIiMG-FiLWY1ZTI1OWJkYTEyMjIj>
- [15] E. Salazar, C. Henríquez, G. Durán, J. Qüense y F. Puen-te-Sotomayor, "How to Define a New Metropolitan Area? The Case of Quito, Ecuador, and Contributions for Urban Planning", *Land*, vol. 10, n.º 4, p. 413, abril de 2021. Accedido el 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/land10040413>
- [16] A. R. Gómez-García, M. L. Vega Chica y J. A. García-Arroyo, "Relationship between the territorial distribution of labor inspectors and work accident injuries: Clustering Ecuadorian provinces into four management scenarios", *Saf. Sci.*, vol. 158, p. 105956, febrero de 2023. Accedido el 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105956>
- [17] J. Álvarez-Gamboja, P. Cabrera-Barona y H. Jácome-Estrella, "Financial inclusion and multidimensional poverty in Ecuador: A spatial approach", *World Develop. Perspectives*, vol. 22, p. 100311, junio de 2021. Accedido el 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2021.100311>
- [18] K. Morales, G. Pacheco y L. P. Viera, "Accidentabilidad laboral en el sector de la construcción: Ecuador, período 2016-2019", *INGENIO*, vol. 4, n.º 2, pp. 35-45, diciembre de 2021. Accedido el 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.29166/ingenio.v4i2.3206>
- [19] M. Paguay, J. D. Febres y E. Valarezo, "Occupational Accidents in Ecuador: An Approach from the Construction and Manufacturing Industries", *Sustainability*, vol. 15, n.º 16, p. 12661, agosto de 2023. Accedido el 23 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/su151612661>
- [20] J. A. Landeweerd, I. J. M. Urlings, A. H. J. De Jong, F. J. N. Nijhuis y L. M. Bouter, "Risk taking tendency among construction workers", *J. Occupational Accidents*, vol. 11, n.º 3, pp. 183-196, febrero de 1990. Accedido el 23 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/0376-6349\(90\)90028-t](https://doi.org/10.1016/0376-6349(90)90028-t)
- [21] M. B. Debela, M. Azage, A. M. Begosaw y N. D. Kabe-ta, "Factors contributing to occupational injuries among workers in the construction, manufacturing, and mining industries in Africa: a systematic review and meta-analysis", *Journal of Public Health Policy*, vol. 43, n.º 4, pp. 487-502, noviembre de 2020. Accedido el 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1057/s41271-022-00378-2>
- [22] X. Dong, X. Wang y J. A. Largay, "Occupational and non-occupational factors associated with work-related injuries among construction workers in the USA", *International Journal of Occupational and Environmental Health*, vol. 21, pp. 142-150, noviembre de 2020. Accedido el 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1179/2049396714Y.0000000107>
- [23] S. R. Mohandes, H. Sadeghi, A. Fazeli, A. Mahdiyar, M. R. Hosseini, M. Arashpour y T. Zayed, "Causal analysis of accidents on construction sites: A hybrid fuzzy Delphi and DEMATEL approach", *Safety Science*. julio de 2022. Accedido el 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105730>
- [24] P. Duan, Y. M. Goh y J. Zhou, "The impact of COVID-19 pandemic on construction safety in China and the U.S.: A comparative study", *Safety Science*, vol. 161, pp. 106076-106076, mayo de 2023. Accedido el 25 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106076>
- [25] International Labour Office. "Guide on Labour Inspection and Social Security | International Labour Organization". ILO Homepage | International Labour Organization. Accedido el 4 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ilo.org/publications/guide-labour-inspection-and-social-security>
- [26] B. Santoso, "The Obstacles of Labor Inspection in Protecting Workers' Rights in Indonesia". *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, mayo de 2018. Accedido el 29 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible:

[https://doi.org/10.14505//JARLE.V9.5\(35\).31](https://doi.org/10.14505//JARLE.V9.5(35).31)

[27] M. Beckmannshagen y A. Fedorets, “Inspections and Compliance: Enforcement of the Minimum-Wage Law”, *Finanzarchiv*, vol. 77. Finanzarchiv, p. 1. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1628/FA-2021-0001>

[28] Q. Meng, W. Liu, Z. Li y X. Hu, “Influencing Factors, Mechanism and Prevention of Construction Workers’ Unsafe Behaviors: A Systematic Literature Review”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18. noviembre de 2020. Accedido el 5 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052644>

[29] C. Zid, N. Kasim, H. Benseghir, M. Kabir y A. Ibrahim, “Developing an Effective Conceptual Framework for Safety Behaviour in Construction Industry”, vol. 65. p. 03006. Accedido el 7 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20186503006>

[30] I. Shohet, M. Luzi y M. Tarshish, “Optimal allocation of resources in construction safety: Analytical-empirical model”, *Safety Science*, vol. 104, pp. 231-238, Accedido el 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2018.01.005>

[31] E. A. Nadhim, C. Hon, B. Xia, I. Stewart y D. Fang, “Falls from Height in the Construction Industry: A Critical Review of the Scientific Literature”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13. Jun. 28, 2016. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/ijerph13070638>

[32] I. Elias, H. Felix, P. David y O. David, “Improving Construction Health and Safety: Application of Cost-Benefit Analysis (CBA) for Accident Prevention”, *International Journal of Construction Management*, vol. 11, pp. 19-35, Jan. 01, 2011. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/15623599.2011.10773159>

**ANEXO A**

Número de trabajadores afiliados y de lesiones (mortales y no mortales) por accidentes de trabajo en el sector de la construcción en Ecuador: 2014-2023.

Año	Guayas		Pichincha		Ecuador	
	Núm. trabajadores	Núm. lesiones	Núm. trabajadores	Núm. lesiones	Núm. trabajadores	Núm. lesiones
2014	48.907	456	72.079	367	149.658	1.524
2015	46.566	400	72.599	273	150.381	1.566
2016	36.053	236	53.217	175	118.222	855
2017	32.275	107	57.408	126	116.390	478
2018	29.730	92	50.884	129	109.002	346
2019	28.680	96	47.560	72	103.493	299

2020	24.228	73	34.060	34	78.363	193
2021	26.473	62	36.596	42	86.037	219
2022	27.877	102	35.868	58	88.116	298
2023	28.846	110	35.336	43	88.031	293
2014-2023						
No mortales		1.713		1.280		5.926
Mortales		21		39		145

Fuente: Elaboración propia a partir del SGRT [13] y REESS [14].

**ANEXO B**

**Ecuaciones**

Tasas de incidencia estandarizadas por edad por cada 1.000 (**ASIRs** - Age-Standardised Incidence Rates) por el método directo: (1)

$$ASIRs(anual) = \frac{1}{\sum_i ESP_i} \sum_i \frac{D_{i,w}}{P_{i,w}} \times 1000 \times ESP_i$$

donde:

- *w* es el año se calcula la ASIRs (2014-2023)
- *i* es el grupo etario
- *ESP<sub>i</sub>* es la población estándar para el grupo de edad *i*
- *D<sub>i,w</sub>* es el número de accidentes de trabajo para el grupo etario *i* calificados en el año *w* [13]
- *P<sub>i,w</sub>* es la población del grupo etario *i* afiliado al sistema de la seguridad social en la mitad de año *w* [14]

$$y=mx+b \tag{2}$$

(3) ANEXO C

Razón de tasas de incidencia (**IRR** - Incidence rate ratio):

$$IRR(\text{anual}) = \frac{ASIRs(\text{Guayas})}{ASIRs(\text{Pichincha})}; CI_{95\%} = IRR \pm 1,96 \times SE$$

donde:

- $CI_{95\%}$  es el intervalo de confianza del 95%
- $SE$  es el error estándar

(4)

Índice Kappa de Cohen (**k**)

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

donde:

- $P_o$  es la proporción de acuerdo observado entre los expertos
- $P_e$  es la proporción de acuerdo esperado por azar

**Cuestionario**

Según su criterio, ¿cuál considera que es el determinante más influyente de los accidentes de trabajo en obras de construcción?

**Puntuar del 1 al 3 en orden descendente de importancia**

(1) = *Muy determinante* (2) = *Determinante* (3) = *Poco determinante*

Respuestas (R)	Puntuación	Ejemplo
<b>R1 (Nivel macro).</b> Ausencia de la inspección de trabajo para verificar el cumplimiento de la normativa		1
<b>R2 (Nivel meso).</b> Limitada capacidad económica de la organización para la implementación de medidas preventivas		2
<b>R3 (Nivel micro).</b> Comportamiento o actitud (in)segura de los trabajadores frente a factores de riesgo		3

*Gracias por su colaboración*



## Estimación de La Resistencia a La Tracción en Suelos Reforzados con Fibras Sintéticas

### Estimation of Tensile Strength in Soils Reinforced with Synthetic Fibers

Johannes Enrique Briceño Balza |  Universidad de los Andes - ULA, Mérida - Venezuela  
Rebeca Carolina Barreto Aldana |  Universidad de los Andes - ULA, Mérida - Venezuela  
Yusleiny Lorena Guerrero Dávila |  Universidad de los Andes - ULA, Mérida - Venezuela

Recibido: 4/9/2024  
Recibido tras revisión: 9/10/2024  
Aceptado: 18/10/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Tracción indirecta, resistencia a la tracción, suelos reforzados, fibras sintéticas.

#### KEY WORDS

Indirect traction, tensile strength, reinforced soil, synthetic fibers.

#### RESUMEN

Un parámetro importante a considerar a la hora de diseñar obras civiles es la resistencia a la tracción del suelo. Este parámetro es despreciado en muchas ocasiones por tener un valor menor que la resistencia a la compresión inducida por esfuerzos cortantes, parámetro que condiciona el diseño. Existen casos particulares donde la resistencia a la tracción es importante por mostrar los primeros indicios de rotura del suelo y servir de alerta antes de producirse la rotura por cortante. Conociendo esto se plantea, para mejorar la resistencia a la tracción, reforzar el suelo con fibras sintéticas, micro y macrofibras, incorporándolas en porcentajes en peso de suelo (0.50, 1.00, 1.50 y 2.00%), evaluando a través del ensayo de tracción indirecta el comportamiento del suelo areno limoso natural y reforzado. Al comparar los resultados en estas dos condiciones, se concluyó que la resistencia a la tracción aumenta cuando el porcentaje de macrofibra es superior al 1.50% en un 3.69%, mientras que al 2.00% aumenta en un 24.00% con respecto al suelo patrón.

#### ABSTRACT

An important parameter to consider when designing civil works is the tensile strength of the soil. This parameter is often neglected because it has a lower value than the compressive strength induced by shear stresses, a parameter that determines the design. There are particular cases where tensile strength is important because it shows the first signs of soil failure and serves as a warning before shear failure occurs. Knowing this, to improve tensile resistance, it is proposed to reinforce the floor with synthetic fibers, micro and macrofibers, incorporating them in percentages by weight of soil (0.50, 1.00, 1.50 and 2.00%), evaluating the behavior through the indirect traction test of the natural and reinforced silty sandy soil. When comparing the results in these two conditions, it was concluded that the tensile strength increases when the percentage of macrofiber is greater than 1.50% by 3.69%, while at 2.00% it increases by 24.00% with respect to the soil pattern.

## I. INTRODUCCIÓN

Cuando se produce la falla de una obra civil o deslizamiento de un talud, ya sea natural o construido, esto afectará negativamente a la sociedad, ya que pueden colapsar viviendas, carreteras, entre otras. Estos deslizamientos se caracterizan típicamente por una inestabilidad repentina y pueden causar muchas víctimas y pérdidas considerables debido a su gran velocidad y larga distancia de afectación [1].

Cuando se evalúan las propiedades mecánicas de un suelo, los parámetros fundamentales para ello son la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), estos representan la resistencia al cortante, evaluada a compresión en un ensayo triaxial (ASTM D2850-82). Estos parámetros son usados para el diseño de toda obra civil, considerando que las fallas asociadas al material suelo se producen solo o principalmente por corte inducido por compresión. Teorías contemporáneas [2], abordan análisis de

estabilidad, teorías de empuje y aparición de grietas de tracción en la masa de suelo; donde ya se comienza a considerar la necesidad de tomar en cuenta la resistencia a la tracción ( $\sigma_t$ ).

Asimismo, autores consideran que hay casos particulares donde es necesario conocer la  $\sigma_t$  [3]. Entre estos casos se tiene el análisis de estabilidad de taludes con presencia de grietas de tracción, aparición de este mismo tipo de grietas en terraplenes de carreteras, en masas de suelo contenidas por muros y grietas reflejadas en capas asfálticas; ocasionando molestias, deterioro e inseguridad. Estas grietas pueden llenarse de agua aumentando el empuje hidrostático, desestabilizando la estructura. Pueden ser el resultado de una variedad de fenómenos, como la baja  $\sigma_v$ , los ciclos de humedecimiento y secado, la desecación o la intemperie [4].

Casi todos los métodos existentes de análisis y diseño no toman en cuenta las grietas de tracción o las tratan de una manera simplista, estas aumentarán significativamente el empuje de la masa de tierra [5]. Los resultados indican que la formación de grietas por tensión aumentará significativamente el empuje activo, mientras que si se considera una  $\sigma_t$  distinta de cero disminuirá la profundidad de las grietas de tracción [5]. Se deben modificar los métodos existentes para el análisis de estabilidad de taludes, ya que quedó demostrado que la condición más desfavorable para la estabilidad es cuando se consideran las grietas de tracción [6].

Ahora bien, debido a que la  $\sigma_t$  en suelos es baja, comparada con la resistencia a la compresión ( $\sigma_c$ ), en la mayoría de los casos al desarrollar métodos y estudios geotécnicos esta se desprecia [7], olvidando que esta es fuente importante para definir el mejor comportamiento del material [8].

Por otro lado, determinar la resistencia a la tracción de manera directa es difícil; en tal sentido, se vienen utilizando equipos de aplicación de carga a tracción directa mediante succión, pero que no tienen la difusión necesaria ni en la mayoría de los laboratorios se cuenta con los equipos necesarios. Por tal razón, se puede determinar esta resistencia con un ensayo indirecto, donde los esfuerzos de tracción son aplicados indirectamente, tal es el caso de la investigación donde se determinó la resistencia a la tracción de forma indirecta, mediante un equipo de compresión confinada [9].

Utilizando el ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño (ASTM C-496, UNE 83.306 e ISO 4108) para hallar la  $\sigma_t$  en suelos, se pudo comprobar que la  $\sigma_t$  es de un valor bajo con respecto a la  $\sigma_c$ , se encuentra en una banda entre el 17 y 19% de  $\sigma_c$  [7], valor significativo en casos donde las primeras alertas de falla se presentan por tracción, ya que la falla por tracción antecede a la falla por corte. Por tanto, contar con información sobre la  $\sigma_t$  es un factor importante para el diseño.

El suelo por sí solo no aporta mucha  $\sigma_t$  por lo que se ha planteado reforzarlo para mejorar y aumentar este parámetro. Una alternativa para ello es incorporar fibras al suelo que aporten  $\sigma_t$ . En tal sentido, utilizar fibras fabricadas de materiales provenientes de los polímeros se ha convertido en una alternativa como agente modificador o de refuerzo [10].

Las fibras de polipropileno se plantearon como material de refuerzo para evitar la aparición de grietas producidas por tracción en varios tipos de suelo humedecido con diferentes contenidos de humedad, se demostró que este refuerzo mejora la  $\sigma_t$  y deformación [11]. Incluso las fibras naturales, como las de coco, mejoran el comportamiento mecánico del suelo, usando porcentajes entre el 12.50-50.00% evaluaron ensayos de corte (ASTM D3080) directo obteniendo mejoras [12].

De igual forma, agregando fibras de PET (polietileno tereftalato) reciclado, en porcentajes de 0.20-1.50% del peso del suelo, se obtuvo un aumento en la compresión simple (ASTM D2166-06) al compararlo con el suelo natural sin reforzar [13]. Utilizando fibras de polipropileno como material de refuerzo distribuido de forma aleatoria en diferentes porcentajes y contenidos de humedad del suelo, se pudo demostrar que mejora la resistencia a la tracción, viéndose afectada la resistencia con el aumento del contenido de humedad [14].

Con el propósito de mejorar la resistencia al corte de suelos arenosos se utilizaron como refuerzo fibras sintéticas y se sometió la muestra a un ensayo triaxial (ASTM D2850-82) comprobando la mejora en la resistencia [15]. Estos mismos autores [16], [17] ampliando la línea de investigación, determinaron las mejoras en cuanto a densidad y resistencia a la tracción tanto en suelos cohesivos como granulares.

Igualmente, reforzando un suelo arcilloso plástico con fibras de polipropileno recicladas y añadiendo cal, ya que sin ella no mejoraba la resistencia a la tracción, se pudo mejorar este parámetro de resistencia entre un 13.00 y 28.00% [18]. Asimismo, reforzando un suelo con fibra de vidrio para la fabricación de adobes, los sometieron a ensayos de compresión, aumentando su capacidad y resistencia [19].

Por otra parte, investigaciones existentes sobre el uso de las fibras de polipropileno con suelo, están dirigidas hacia la mejora de sus propiedades para su uso en carreteras y en pavimentos; así como para su uso en suelos expansivos; es por ello que se recomienda este tipo de métodos en las construcciones, como carreteras, muros de contención, terraplenes de ferrocarril, protección de taludes, entre otros [20].

Usando ensayos de tracción indirecta para determinar la  $\sigma_v$ , el ensayo de Soporte California CBR (ASTM D1883-07) y la resistencia al corte triaxial (ASTM D2850-82) en suelos reforzados con fibras [21], evaluaron fibras naturales y sintéticas de poliéster en suelos arcillosos, evaluando

contenidos de fibra en porcentajes del 0,50, 1.00 y 2.00%, con longitudes de 2.50, 5.00 y 7.50 mm. Se observó que la cantidad de fibra y su longitud influía en los resultados, la resistencia a la tracción con fibras de poliéster alcanzó valores de 48.57 kPa, también aumento los parámetros de resistencia (ángulo de fricción interna en 100.00% y cohesión en 70.00%)

Otros investigadores también resaltan las bondades de la utilización de diferentes tipos de fibra para ser mezcladas con el suelo y así mejorar sus características, especialmente la  $\sigma_t$ . En suelos arcillosos incorporando bajos porcentajes de fibra sintética (0.20-0.80%) se compararon resultados de densidad seca máxima (Proctor Modificado, AASHTO T180D) y ensayo de Soporte California CBR (ASTM D1883-07) entre los suelos reforzados y el natural, mejorando sus características mecánicas [22].

Por tales razones, esta investigación planteó incorporar fibras sintéticas al suelo y estimar la  $\sigma_t$ , mediante el ensayo de tracción indirecta o ensayo brasilero, probando con micro y macrofibras de polipropileno. Estas fibras se incorporaron al suelo areno limoso en un porcentaje de 0.50, 1.00, 1.50 y 2.00% en función del peso, con un contenido de humedad del 17.00%, esta humedad permitió detectar a simple vista la aparición de la grieta de tracción, elaborando 30 briquetas por cada porcentaje de fibra añadida. Estos resultados de la  $\sigma_t$  de las briquetas reforzadas se compararon con la  $\sigma_t$  de un suelo patrón (sin fibra, condición natural).

## 2. MÉTODO

La investigación se fundamentó en el método del ensayo de tracción indirecta o ensayo brasilero (ASTM C-496, UNE 83.306 e ISO 4108), donde se planteó evaluar el comportamiento del suelo, tomando en cuenta como primera etapa la búsqueda de la resistencia a la tracción de la muestra patrón sin reforzar y muestras conformadas por suelo reforzado con fibras sintéticas, a modo de comparación.

Los ensayos realizados para la caracterización del suelo fueron: granulometría por tamizado (ASTM D422) y límites de consistencia o de Atterberg (ASTM D4318), que permitieron clasificar el suelo como una arena limosa. De igual forma, se realizaron ensayos de tracción indirecta tanto en la muestra patrón como en las reforzadas con diferentes porcentajes de fibras. A continuación, se presenta el procedimiento llevado a cabo.

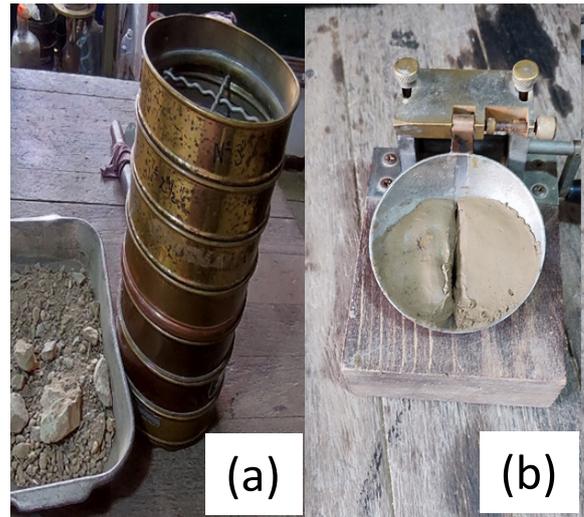
### 2.1 CARACTERIZAR EL TIPO DE MATERIAL

Como punto de inicio al estudio de la caracterización se realizó la toma de material, en el sector Alto Prado, Municipio Libertador del Estado Mérida, Venezuela, con coordenadas UTM (19N 62620.50; 51534.80).

Seguidamente, se realizó del ensayo de granulometría (ASTM D422), el cual se basó en la selección de una muestra significativa, con la finalidad de conocer cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas del material de trabajo y el ensayo de límites de consistencia (ASTM D4318), con la finalidad de determinar el límite líquido y la plasticidad, para de esta manera poder realizar la caracterización del material. Como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1.**

Ensayo granulométrico y límites de consistencia. (a) ensayo granulométrico por tamizado, (b) ensayo de límites de consistencia.



### 2.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA PATRÓN

Para fabricar las briquetas el material se encuentra en estado seco, se preparó una mezcla agregando una cantidad de 1.500 g de material y 255 ml de agua que representan un 17% del peso de la muestra, en un recipiente de aluminio, donde se procedió al amasado con el fin de incorporar de una manera uniforme los materiales, proceso mostrado en la Figura 2.

**Figura 2.**

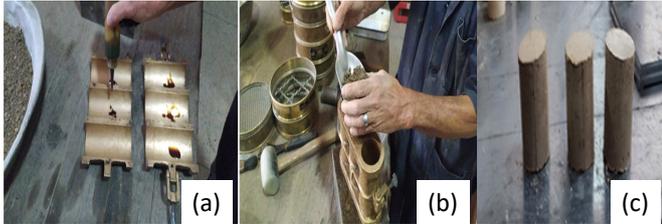
Preparación de la muestra patrón. (a) colocación de agua a la muestra de suelo para garantizar contenido de humedad, (b) amasado de la muestra para incorporar el agua al suelo.



La Figura 3 muestra la fabricación de la briqueta del material patrón en el molde (diámetro 2" y longitud 2.50"), compactadas en una sola capa con una energía de compactación de diez (10) golpes con un martillo de 1.200 g. Este proceso se repitió para elaborar 30 briquetas que posteriormente se ensayaron a tracción indirecta para determinar la resistencia a la tracción.

**Figura 3.**

Elaboración de briquetas de la muestra patrón. (a) preparación del molde para tres briquetas, (b) colocación del material del molde para la compactación, (c) briquetas compactadas.



### 2.3. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA O ENSAYO BRASILEIRO (ASTM C-496, UNE 83.306 E ISO 4108), A LA MUESTRA PATRÓN

Para evaluar el comportamiento de suelos sin reforzar, sometidos a tracción, y obtener su resistencia, se presenta el siguiente procedimiento práctico en el laboratorio: con el material preparado con el contenido de humedad establecido se construyeron las briquetas utilizando el molde mostrado en la Figura 3, con una energía de compactación de 10 golpes con el martillo estándar del equipo. Luego de la elaboración de las briquetas, se procedió con la realización del ensayo, el cual se basó en la colocación de manera horizontal de cada una de ellas en una prensa, como se muestra en la Figura 4 (a), dejándola ajustada y preparada. Posteriormente, se llevó a la máquina de ensayo (máquina de ensayo de tracción), se comenzaron a aplicar las cargas progresivamente, hasta llegar al punto de rotura (Figura 4 [b]); cada una de las briquetas presentó sistemas de agrietamiento, donde la grieta producida por tracción se mostró de forma transversal a la sección de aplicación de la carga (Figura 4 [c]). Este proceso se repitió en cada briqueta, para un total de 30 ensayos, obteniendo así un conjunto de resultados.

### 2.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA REFORZADA

Se probaron dos tipos de fibras en las mezclas, comenzando con micro y luego con macrofibra, probando con diferentes porcentajes de 0.50, 1.00, 1.50 y 2.00% sobre el peso de la muestra de suelo, necesario para fabricar el modelo de briqueta en el molde de ensayo. Aclarando que esta adición se hizo basada en el peso de la muestra y no en el peso específico ni en el volumen y que la fibra se recortó a la mitad para adecuarla al molde de compactación. La escogencia de los porcentajes de fibra y su longitud a utilizar se basó en ex-

**Figura 4.**

Ensayo de tracción indirecta (a) colocación de las briquetas en la prensa de tracción, (b) briqueta montada en la máquina de tracción indirecta, (c) grieta de tracción presentada durante el ensayo.



periencias de investigaciones anteriores [10, 21]. La Tabla 1 muestra las características de la fibra, número de briquetas elaboradas y porcentaje de fibra utilizado.

Se siguió el mismo procedimiento de fabricación de briquetas ya descrito. La Figura 5 muestra el proceso de amasado de la muestra reforzada y la briqueta compactada.

**Figura 5.**

Preparación de la muestra reforzada. (a) mezclado en húmedo con la macrofibra, (b) briqueta compactada.



### 2.5. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA A LA MUESTRA REFORZADA

El procedimiento realizado a las briquetas reforzadas es idéntico al realizado a la muestra patrón. Este proceso se repitió con los diferentes porcentajes de fibra, 30 briquetas reforzadas para cada porcentaje, teniendo así un total de 120 briquetas ensayadas, obteniendo un conjunto de resultados que fueron comparados con los de la muestra patrón.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de haber realizado paso a paso el proceso metodológico se presentan los resultados obtenidos a partir del ensayo de las briquetas.

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

#### 3.1.1. Material de suelo

Se estudió la caracterización de la muestra de suelo, mediante el ensayo de granulometría por tamizado (ASTM

**Tabla 1.**

Características y porcentajes de las fibras utilizada.

Características técnicas de las fibras						Número de briquetas por porcentaje de fibra			
Tipo de fibra	Marca	Material	Densidad (kg/l)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	0.50 %	1.00 %	1.50 %	2.00 %
Microfibra	SIKA	Polipropileno	0.91	6.00	-	-	-	-	-
Macrofibra	SIKA	Polipropileno	0.91	6.50	0.46	30	30	30	30

D422) y límites de consistencia (límites de Atterberg) (ASTM D4318), manipulando el material bajo las condiciones y procedimiento establecido por estos ensayos. Al realizar el análisis granulométrico a través de la vía húmeda, se pudo evidenciar, un mayor porcentaje de arenas y finos con relación al contenido de material grueso, de igual forma, se hallaron los límites de consistencia del suelo y mediante el método de clasificación del Sistema Unificado de clasificación de Suelos (SUCS) se determinó que el tipo de suelo es una arena limosa (SM). La Tabla 2 muestra el resumen de los resultados de caracterización del suelo.

**Tabla 2.**

Resumen de la caracterización del material.

Ensayo granulométrico y límites de consistencia							
% G	% S	% F	% LI	IP	Cu	Cc	Clasificación
0.00	53.86	46.15	26.63	4.06	6.27	0.16	SM

%G, representa el porcentaje de gravas, %S, representa el porcentaje de arenas, %F, es porcentaje de finos, %LI, es límite líquido, IP, representa el índice plástico, Cu, es el índice de uniformidad, Cc, es el índice de curvatura, SM, representa la clasificación SUCS.

### 3.1.2. Material de fibra sintética

Se realizaron pruebas con dos tipos de fibras. Inicialmente se planteó el reforzamiento con microfibra sintética, en este caso, trabajar con este material no funcionó, ya que por su estructura las fibras tienden a unirse entre ellas sin poder integrarse correctamente con la muestra de suelo seco y húmedo que es la condición inicial, por lo que se descartó este tipo de fibras. En la Figura 6, se puede apreciar lo ocurrido al momento de mezclar la microfibra con el suelo.

Por consiguiente, se descartó la microfibra, optando finalmente por la utilización de la macrofibra. Cabe destacar que los filamentos de macrofibra se recortaron a la mitad, 3,25 cm ( $L_{fibra}=1.28''$ ), para poder adaptarlas al diámetro del equipo de compactación de las briquetas (2'') (ver Figura 4), la longitud de las briquetas  $L_{briquetas}=2.50''$ . Manteniendo una relación entre longitudes  $L_{fibra}=0.512L_{briquetas}$ .

### 3.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA A LA MUESTRA PATRÓN Y REFORZADA

El ensayo de tracción indirecta, se realizó tanto para las briquetas de muestra patrón como a las reforzadas con macrofibra, como se explicó de forma detallada anteriormente, arrojando los siguientes resultados mostrados en la Tabla 3.

### 3.3. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN ENTRE MUESTRA PATRÓN Y REFORZADAS

La Figura 7 muestra la dispersión de los resultados de las 30 briquetas de la muestra patrón y los diferentes porcentajes de macrofibra de refuerzo utilizada. Por otro lado, en la Figura 8 se representa el valor del promedio aritmético de los diferentes casos evaluados.

En la figura anterior se puede notar que las briquetas con los primeros porcentajes (0.50 y 1.00%) de macrofibra muestran un  $\sigma_t$  por debajo del patrón, esto puede ocurrir porque la fibra no aporta la suficiente resistencia comparativamente con lo que aporta el material de suelo sustituido, la sustitución del material se hizo basada en peso de suelo, sin considerar la diferencia de pesos específicos relativos que existe entre el suelo y la fibra, lo que implica que se está sustituyendo un material por otro que pesa menos, pero ocupa mucho volumen.

Los porcentajes de mayor aporte de macrofibra (1.50 y 2.00%) aumentan la resistencia del suelo con respecto al patrón, la adición de 1.50% de fibra aumenta la resistencia en un 3.69%, mientras que el 2.00% aumenta la resistencia en un 24.00%. Este resultado ascendente indica que es posible seguir aumentando el porcentaje de macrofibra para ganar mayor resistencia; sin embargo, hay que evaluar otras características del suelo que se puedan ver afectadas por un valor excesivo de este material en adición, aspecto no evaluado en esta investigación y que ese porcentaje permita un mezclado uniforme.

Esta tendencia en el aumento de la  $\sigma_t$  también es observada en las investigaciones referentes [14-18], [21], existen diferencias con los antecedentes revisados tanto en el tipo de suelo, materia muy diverso con incertidumbre en su comportamiento por carecer de estructura, contenido de humedad, tipo de fibras, características mecánicas y propiedades elásticas, equipos para determinar resultados

**Tabla 3.**

Resultados del ensayo de tracción indirecta en la muestra patrón y reforzadas

Muestra n=30	Patrón (kN/m <sup>2</sup> )	Suelo reforzado con macrofibra (kN/m <sup>2</sup> )			
		0.50 %	1.00 %	1.50 %	2.00 %
1	22.20	17.81	15.65	24.14	24.79
2	22.49	16.85	21.27	27.77	24.21
3	24.50	19.14	22.79	16.85	23.06
4	22.50	18.60	15.95	19.58	29.76
5	23.52	19.59	19.20	26.27	29.09
6	22.15	21.10	12.44	22.47	32.79
7	22.23	22.08	25.78	26.44	24.31
8	23.43	18.86	23.99	30.37	23.53
9	24.21	18.96	22.52	24.31	29.57
10	22.46	20.87	21.59	22.22	35.00
11	23.18	19.41	23.52	21.29	28.84
12	23.35	19.52	25.38	22.47	26.86
13	24.51	21.46	19.25	25.04	27.47
14	22.06	20.36	28.25	24.48	33.14
15	23.33	15.58	24.14	22.21	28.38
16	23.82	17.43	23.55	21.56	29.90
17	23.45	18.23	22.31	24.39	24.53
18	23.58	17.57	20.71	26.37	26.41
19	23.83	18.92	18.64	21.56	30.98
20	23.47	21.54	19.82	26.37	28.36
21	22.33	22.54	29.43	22.55	29.09
22	23.17	20.57	18.18	23.52	34.32
23	23.43	18.61	20.68	24.43	27.43
24	23.53	19.47	21.56	23.53	27.93
25	24.10	17.54	22.01	26.66	32.55
26	25.46	17.45	23.08	30.37	30.90
27	24.49	16.27	29.85	25.38	33.35
28	23.47	19.37	24.76	24.46	28.14
29	23.10	11.41	25.65	27.18	32.37
30	25.32	18.61	28.45	24.33	33.97
Promedio	23.42	18.86	22.35	24.28	29.04
Desviación Estándar	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03

y parámetros analizados, esto hace difícil la comparación, por lo que hay que tomar los resultados con prudencia y ver su aplicabilidad en casos particulares.

En la Tabla 4 se presenta el promedio aritmético de la deformación unitaria ( $\epsilon$  %) que sufren las briquetas patrón y las reforzadas.

**Tabla 4.**Deformación unitaria ( $\epsilon$  %) suelo patrón y reforzado con macrofibra.

Muestra n=30	Patrón	Suelo reforzado con macrofibra			
		0.50 %	1.00 %	1.50 %	2.00 %
Deformación unitaria ( $\epsilon$ %)	0.34	1.85	2.87	2.93	3.05

La Figura 9 muestra la  $\epsilon$  % contra el  $\sigma_t$  del suelo patrón y las Figuras 10 y 11 los valores del suelo reforzado.

Se puede notar en los resultados presentados que reforzar el suelo areno limoso con macrofibra tornó el material ligeramente más deformable con respecto al patrón a medida que se aumentó el porcentaje de fibra, esto es un aspecto importante a evaluar para su aplicación.

En cuanto al uso en campo de las fibras sintéticas como material de refuerzo, esto está sujeto a un análisis costo-beneficio. El costo de la fibra en comparación con el material suelo es mucho mayor, por lo que se hace viable en pequeños volúmenes de material como en rellenos de muros de contención para evitar o minimizar la aparición de grietas de tracción. Con la dosificación de 2.00% de macrofibra se necesitan por metro cúbico de suelo 40.2 kg de fibra, esto representa un costo de USD 120.60 en comparación con USD 25.00 que puede costar 1 m<sup>3</sup> de suelo de préstamo. La decisión de su uso dependerá si el beneficio justifica la inversión.

#### 4. CONCLUSIONES

Culminado el proceso de ensayos y análisis de resultados, se presentan las conclusiones de esta investigación. La resistencia a la tracción del suelo, a pesar de tener un valor pequeño en comparación con la resistencia a la compresión, representa un parámetro importante a considerar en algunos tipos de obras civiles, donde es de relevancia los primeros indicios de rotura del material. Tal es el caso de presencia de grietas de tracción en taludes, desecación de suelos y en material compactado en terraplenes y rellenos en muros.

Esta investigación evaluó la incorporación de fibras a la masa de suelo con la intención de mejorar su resistencia a la tracción, esto con la finalidad de disminuir la presencia de grietas de tracción que afectan la estabilidad de una obra civil. Se utilizaron microfibras, pero este material no se logró mezclar uniformemente con el suelo, en estado seco y húmedo, descartándose como posibilidad.

Se pudo comprobar que reforzar el suelo areno limoso (SM) con macrofibras mejora sustancialmente la resistencia a la tracción, concluyendo que al reforzar este suelo con 1.50 y 2.00% de macrofibra aumenta la resistencia a la tracción en 3.69 y 24.00%, respectivamente, en comparación con el patrón; sin establecer este rango como un máximo de adición, ya que la tendencia indica aumento en la resistencia a medida que se aumenta el porcentaje de fibra por encima del 1.50%.

De igual forma, se evidenció un incremento de la deformación unitaria del suelo reforzado en comparación con el patrón, se debe evaluar las deformaciones laterales y asentamiento que este incremento puede ocasionar y que tan significativo es para la estructura vial donde se va a utilizar.

## RECOMENDACIONES

Seguir esta línea de investigación, aumentando los porcentajes de macrofibra como material de refuerzo en el suelo, evaluando el comportamiento de la resistencia a la tracción y chequeando como estos mayores porcentajes pueden afectar las propiedades mecánicas y elásticas del material.

Para los porcentajes de macrofibra incorporada 0.50 y 1.00%, es necesario evaluar con mayor precisión qué sucede con la resistencia a la tracción, ya que se esperaba que al incorporar la misma aumentaría la resistencia sin importar el porcentaje, esto no sucedió sino hasta porcentajes mayores. Evaluar la posibilidad de que la resistencia aportada por el suelo por sí solo sea mayor que la aportada por la fibra en esos porcentajes bajos.

Probar con otros tipos de fibra, con textura diferente a la utilizada, por ejemplo, la fibra corrugada, fibras de material reciclado como aporte ecológico y otros tipos de suelo. Al igual que aquellas que sean de otro tipo de polímero diferente al polipropileno.

Hacer la adición del porcentaje de fibra realizando una corrección volumétrica, ya que en esta investigación se hizo basada en el peso del suelo, sin considerar la gran diferencia entre los pesos específicos relativos de los sólidos (Gs) del suelo y la fibra que difieren en más de un 20.00%. Esta diferencia hace que la sustitución no sea proporcional, porque se sustituye un material que pesa más por uno que pesa menos, pero ocupa mucho más volumen, esto pudiera afectar los resultados por las proporciones de material con respecto al patrón.

## REFERENCIAS

- [1] G. Chen, P. Tang and R. Huang. «Critical tension crack depth in rockslides that conform to the three-section mechanism». *Landslides*, n.º 18. 79-88. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01471-x>. 2021.
- [2] W. Rankine. On the stability of loose earth. *Philosophical transactions of the Royal Society London*. vol. 147. pp. 9-27. DOI: 10.1098/rstl.1857.0003. 1857.
- [3] G. Ávila. *Resistencia a la tracción. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. España. <http://hdl.handle.net/10803/6233>. 2004.
- [4] S. Utili. «Investigación mediante análisis límite sobre la estabilidad de taludes con fisuras». <https://www.icevirtualibrary.com/doi/epdf/10.1680/geot.11.P.068>. 2013.
- [5] M. Abdollahi, F. Vahedifard, and M. Abed. «Effect of Tension Crack Formation on Active Earth Pressure Encountered in Unsaturated Retaining Wall Backfills». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol 147, issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002434. 2021.
- [6] L. Tang, Z. Zhao, Z. Luo and Y. Sun. «What is the role of tensile cracks in cohesive slopes?» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical and Engineering*, vol. 11. 314-324. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.09.007>. 2019.
- [7] J. Briceño. *Modelo numérico del comportamiento de la grieta de tracción en suelos*. Tesis doctoral. Universidad de Los Andes. Venezuela. [https://www.researchgate.net/publication/370774191\\_Tesis\\_Doctoral\\_Modelo\\_numerico\\_del\\_comportamiento\\_de\\_la\\_grieta\\_de\\_traccion\\_en\\_suelos](https://www.researchgate.net/publication/370774191_Tesis_Doctoral_Modelo_numerico_del_comportamiento_de_la_grieta_de_traccion_en_suelos). 2023.
- [8] P. Garnica, P. y G. Itandehui. Algunos aspectos de la resistencia a la tensión y fatiga en suelos arcillosos estabilizados con cal. *Publicación Técnica 230*. Instituto Mexicano del Transporte. México. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt230.pdf>. 2023
- [9] D. A. Farrel, E. L. Greacen and W. E. Larson. «The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 31, n.º 4. 445-450. <https://doi.org/10.2136/sssaj1967.03615995003100040011x>. 1967.
- [10] J. Briceño, L. Castillo y M. Mercado. *Evaluación de la resistencia a la tracción indirecta y estabilidad de mezclas asfálticas en frío reforzadas con fibras*. Tesis de pregrado. Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. 2023.
- [11] Viswanadham B.V.S, Jha B.K. & Pawar S.N. «Influence of geofibers on the flexural behavior of compacted soil beams». *Geosynthetics International*, vol. 17, n.º 2, pp. 86-99, DOI: 10.1680/gein.2010.17.2.86 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77956241499&doi=10.1680%2fgein.2010.17.2.86&partnerID=40&md5=e70789b4f5d6e78b32929eb2f8d24ac9>. 2010.
- [12] D. Jaramillo y D. Londoño. *Suelos reforzados con fibras naturales*. Tesis de grado. Universidad EIA. Colombia. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/3439>. 2012.
- [13] J. López. *Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)*. Tesis de pregrado. Universidad EIA. Colombia. <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/d9f7a82a-9857-479f-a78d-a4a8f60ece5b>. 2013.
- [14] C.-S. Tang, C.-S. Wang, Y.-J. Cui, B. Shi & J. Li. «Tensile

strength of fiber-reinforced soil». *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, n.º 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546). 2016.

- [15] J. Clariá y P. Vettorelo. Mecanismos de resistencia al corte en una arena reforzada con fibras. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Santa Fe Argentina. [https://www.researchgate.net/profile/PaulaVettorelo/publication/315792515\\_Mecanismos\\_de\\_resistencia\\_al\\_corte\\_en\\_una\\_arena\\_reforzada\\_con\\_fibras/links/58e543af0f7e9b5622f56a90/Mecanismos-de-resistencia-al-corte-en-una-arena-reforzada-con-fibras.pdf](https://www.researchgate.net/profile/PaulaVettorelo/publication/315792515_Mecanismos_de_resistencia_al_corte_en_una_arena_reforzada_con_fibras/links/58e543af0f7e9b5622f56a90/Mecanismos-de-resistencia-al-corte-en-una-arena-reforzada-con-fibras.pdf). 2016.
- [16] P. Vettorelo y J. Clariá. «Suelos reforzados con fibras: estado del arte y aplicaciones». *Revista Facultad de Ciencias Exactas. Físicas y Naturales*, vol. 1, n.º 1. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6856/7934>. 2014.
- [17] P. Vettorelo y J. Clariá. Arenas reforzadas con fibras sintéticas. Variación del comportamiento con la compacidad. [https://www.researchgate.net/profile/Paula-Vettorelo/publication/273763342\\_Arenas\\_reforzadas\\_con\\_fibras\\_sinteticas\\_Variacion\\_del\\_comportamiento\\_con\\_la\\_compacidad/links/550b0e180cf285564096f848/Arenas-reforzadas-con-fibras-sinteticas-Variacion-del-comportamiento-con-la-compacidad.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Paula-Vettorelo/publication/273763342_Arenas_reforzadas_con_fibras_sinteticas_Variacion_del_comportamiento_con_la_compacidad/links/550b0e180cf285564096f848/Arenas-reforzadas-con-fibras-sinteticas-Variacion-del-comportamiento-con-la-compacidad.pdf). 2012.

## ANEXOS

**Figura 6.**

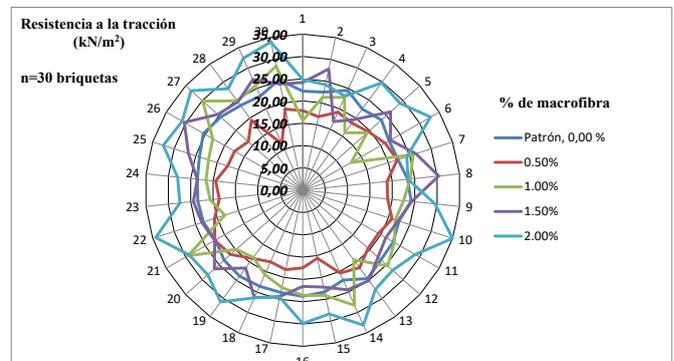
Mezcla de microfibras con la muestra del suelo. (a) muestra de suelo seco con microfibras, (b) muestra de suelo húmedo mezclado con microfibras.



- [18] M. Dafalla. A. Moghal. A. Al-Obaid. «Enhancing tensile strength in clays using polypropylene fibers». *International Journal of GEOMATE*, vol. 12, n.º 29, pp. 33-37. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85011661332&partnerID=40&md5=328f2becaf115da03db82cb3da976cb8>. 2017.
- [19] E. Sumba y M. Zumba. *Comparación de parámetros mecánicos y físicos del adobe tradicional con adobe reforzado con fibra de vidrio*. Tesis de pregrado. Universidad de Cuenca. Cuenca. Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30095>. 2018.
- [20] F. Molina. *Investigación sobre los procesos de estabilización de suelos para fines constructivos con fibras naturales y sintéticas*. Tesis de pregrado. Universidad de Sevilla. España. <https://hdl.handle.net/11441/104011>. 2020.
- [21] M. Nezhad. A. Tabarsa & N. Latifi. «Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay». *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 13, n.º 3, 626-642. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>. 2021.
- [22] F. Solís y D. Inga. *Análisis del comportamiento mecánico del suelo arcilloso reforzado con fibras de polipropileno en la Merced-Junín 2021*. Tesis de Pregrado. Universidad Continental. Huancayo. Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11369>. 2021.

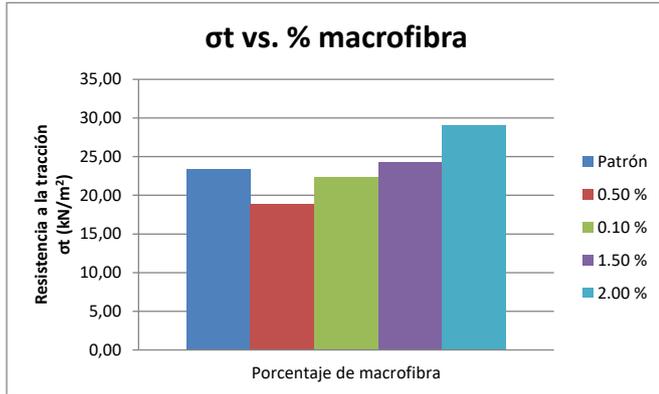
**Figura 7.**

Dispersión de resultados, resistencia a la tracción, suelo patrón y reforzado con macrofibra.



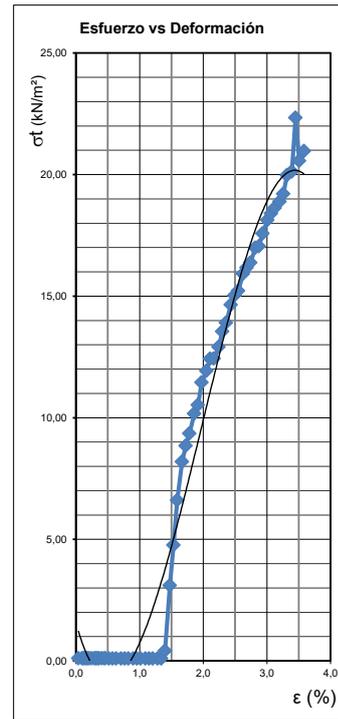
**Figura 8.**

Resultados promedio, resistencia a la tracción, suelo patrón y reforzado con macrofibra.



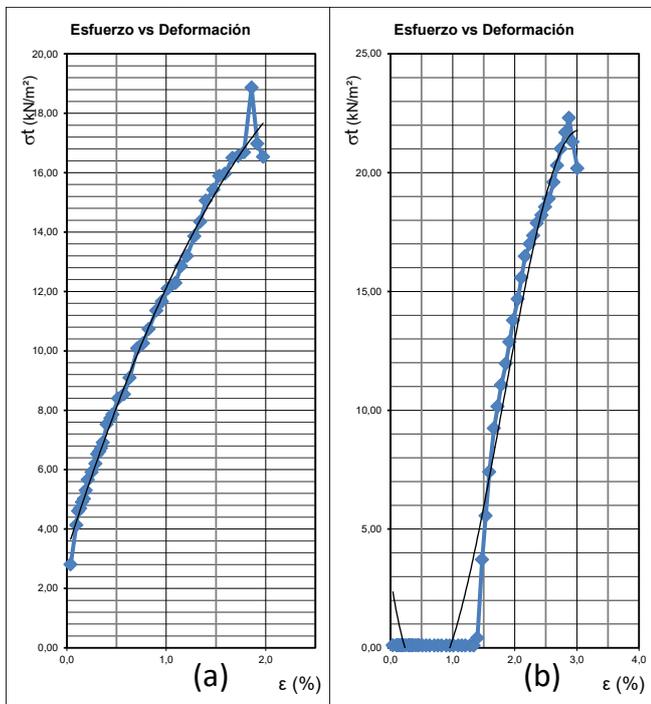
**Figura 9.**

ε % contra el σt del suelo patrón



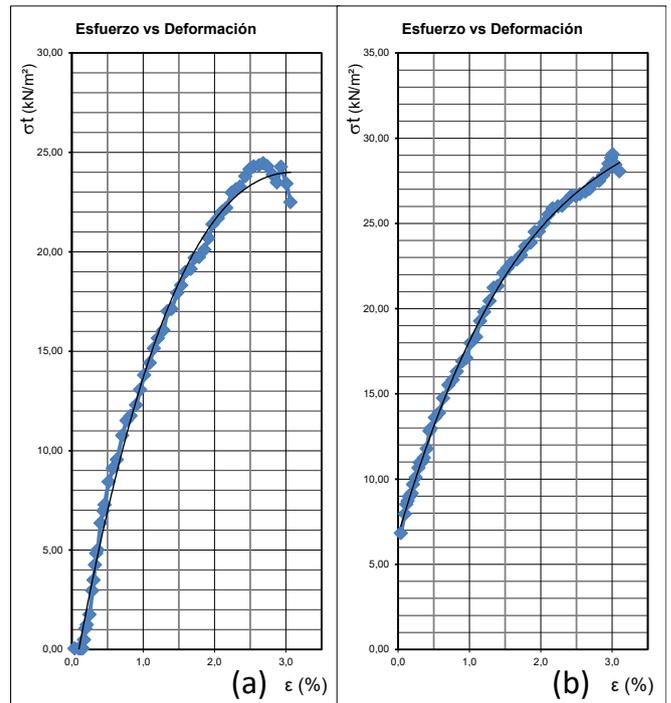
**Figura 10.**

ε % contra el σt del suelo reforzado con macrofibra. (a) 0.50% de microfibra, (b) 1.00% de microfibra.



**Figura 11.**

ε % contra el σt del suelo reforzado con macrofibra. (a) 1.50% de microfibra, (b) 2.00% de microfibra.





# REVISTA INGENIO

## Métodos de Intervención Centrales para Combatir Pérdidas Reales y Aparentes de Agua en Sistemas de Distribución

### Central Intervention Methods for Combating Real and Apparent Water Losses in Distribution Systems

Erick Jonnan Rueda Meza |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador  
Bryan David González Carrillo |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador  
Monica Susana Delgado Yáñez |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador  
Diego Fernando Paredes Méndez |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador

Recibido: 4/6/2024  
Recibido tras revisión: 23/10/2024  
Aceptado: 5/11/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Indicadores de desarrollo, agua potable, distribución de agua, gestión de recursos hídricos, IWA, consumo de agua.

#### KEY WORDS

Development indicators, drinking water, water distribution, water resources management, iwa, water consumption.

#### RESUMEN

Según la International Water Association (IWA) las pérdidas de agua en las redes de distribución de abastecimiento potable se traducen en problemas ambientales, daños en infraestructura y gastos económicos innecesarios. El objetivo del presente estudio es realizar una revisión bibliográfica de los métodos de intervención centrales para la reducción de pérdidas de agua en redes de distribución. Se realizó un análisis cualitativo de 250 documentos, seleccionando 22 para identificar métodos efectivos para reducir las pérdidas de agua, destacando que las pérdidas reales representan el 46% y las aparentes el 22%. También se analiza 136 casos de estudio, se observó que el control de presión es el método más eficiente para gestionar el agua no facturada, y que combinar diferentes métodos es una estrategia eficaz para reducir costos. Además, los indicadores de prevención y análisis de fugas se emplean ampliamente, con un uso del 43% en el manejo de pérdidas aparentes.

#### ABSTRACT

According to the International Water Association (IWA), water losses in drinking water distribution networks result in environmental problems, damage to infrastructure, and unnecessary economic expenses. The objective of the present study is to conduct a literature review of central intervention methods for the reduction of water losses in distribution networks. A qualitative analysis of 250 documents was carried out, selecting 22 to identify effective methods to reduce water losses, highlighting that real losses represent 46% and apparent losses 22%. Also analyzing 136 case studies, it was observed that pressure control is the most efficient method to manage non-revenue water, and that combining different methods is an effective strategy to reduce costs. In addition, leakage prevention and analysis indicators are widely used, with 43% use in the management of apparent losses.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de la industria y la gestión doméstica, existen diversos factores, como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la urbanización, que ejercen presión tanto sobre los recursos hídricos como sobre la infraestructura destinada al suministro de agua potable [1-4].

Las considerables pérdidas de agua por fugas en las redes de distribución y los volúmenes suministrados sin

facturación son factores críticos que complican la gestión y el abastecimiento eficiente [5-8].

Las redes de transmisión y distribución de agua potable experimentan pérdidas, las cuales pueden clasificarse como reales o aparentes [9]. Este problema genera varias consecuencias negativas, como la pérdida de agua potable, la reducción en la calidad del servicio, impactos ambientales y pérdidas económicas para la empresa responsable

del suministro, así como en menor escala para los usuarios [10-12].

A nivel global, la demanda de agua sigue aumentando mientras las fuentes de abastecimiento disminuyen, lo que convierte al agua en un recurso escaso. Aunque el 70% del planeta está cubierto de agua, solo el 2,5% es potable y menos del 1% está disponible para uso humano, según la ONU [5, 12]. Por esta razón, es fundamental gestionar el agua potable de manera eficiente, implementando estrategias tanto a corto como a largo plazo. El objetivo es maximizar la distribución efectiva del volumen disponible y reducir las pérdidas [5].

Con el tiempo, un sistema de agua potable puede sufrir problemas, como el desgaste de tuberías, componentes obsoletos o mal conectados y medidores defectuosos, lo que resulta en un desperdicio de agua y una gestión ineficiente del recurso [13, 14].

El agua no contabilizada se compone de pérdidas aparentes y reales [5], se puede apreciar un detalle en la tabla 1 propuesta por la IWA (International Water Association) el balance hídrico que se da en un suministro de agua entregado [15, 16].

Una fuga provoca una reducción en el rendimiento volumétrico del sistema, ya que aumenta el volumen de agua perdido y disminuye la presión en toda la red [17-19]. Esta caída en la presión y el caudal requiere un mayor consumo de energía en los sistemas de bombeo para satisfacer la demanda, lo que no solo afecta el rendimiento y el control del sistema, sino que también compromete la calidad del servicio [20].

La calidad de los materiales es un factor clave que afecta las fugas, ya que influye en la vida útil de los componentes del sistema. Un material de baja calidad requiere reparaciones más frecuentes, lo que a su vez conlleva un mayor desperdicio de agua [21].

El análisis de agua no facturada implica el cálculo del balance hídrico, donde sus componentes deben estar claramente definidos, ser reproducibles, entendibles y prácticos [9]. Existen métodos de intervención para controlar problemas en las redes de distribución de agua potable, esto con el fin de poder actuar de manera emergente para resolver los problemas presentes; los más representativos son los siguientes, en las pérdidas reales: gestión de la presión, control y detección de fugas, gestión de la infraestructura, agilidad y calidad de las reparaciones; en las pérdidas aparentes tenemos: reducción de errores de medición, mantenimiento adecuado del catastro de usuarios, implementación del sistema comercial adecuado y el combate a los fraudes y conexiones clandestinas, dichos indicadores permiten medir, cuantificar, detectar y localizar las pérdidas de agua potable en el sector hidráulico para contribuir a aumentar la disponibilidad de agua dada la escasez del recurso hídrico [22]. Las roturas además de afectar a los usuarios también afectan a las empresas suministradoras de agua debido a que los costos por reparación pueden ser muy elevados [23-25].

En el año 2003, Richard Pilcher líder del International Water Association Water Loss Task Force (WLFT) presentó estrategias, metodologías, procedimientos y técnicas para el control de pérdidas e incremento de agua disponible para generaciones venideras [13, 14, 26, 27], explicadas a continuación

**Tabla 1.**

Balance hídrico de un sistema de agua potable

<b>Volumen de entrada al sistema Qi</b>	Consumo autorizado QA	Consumo autorizado facturado QAF	Agua facturada exportada Consumo facturado medido	Agua facturada		
			Consumo facturado no medido			
	Pérdidas de agua QP	Consumo autorizado no facturado QANF	Consumo autorizado no facturado	Consumo no facturado medido	Agua no facturada	
				Consumo no facturado no medido		
		Pérdidas aparentes QPA	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado Inexactitudes en medidores y errores de manejo de datos		
				Fugas en las tuberías de aducción y distribución		
	Pérdidas reales QPR	Fugas y reboses en tanques de almacenamiento Fugas en conexiones de servicio hasta el medidor del cliente				

Nota. Adaptado de IWA (International Water Association) [16].

### 1.1. PÉRDIDAS REALES

Las pérdidas reales representan volúmenes de agua que se desperdician en un periodo determinado debido a fugas, roturas, estallidos o reboses [28, 29]. Estas pérdidas se clasifican de dos maneras: por su ubicación dentro del sistema y por su tamaño y duración [30].

Según su ubicación, las pérdidas pueden originarse en distintos puntos [31]. Las fugas en las troncales de transmisión y distribución ocurren en las tuberías, uniones y válvulas de estos sistemas, con tiempos de fuga que varían de cortos a medianos y caudales que suelen ser moderados a altos. Por otro lado, las fugas en los puntos de conexión aparecen en las acometidas que van hacia los medidores de los usuarios [2]. Estas fugas presentan caudales más bajos, pero pueden durar más tiempo. Las fugas y reboses en tanques de almacenamiento son causadas por fallos en los controles de ingreso de agua o por filtraciones en las paredes de concreto, debido a un mantenimiento deficiente.

En términos de tamaño y tiempo de fuga, las pérdidas se dividen en tres tipos principales. Las fugas visibles o reportadas son aquellas que rápidamente se hacen evidentes en la superficie debido a roturas o fallos en las uniones de las tuberías. Las fugas ocultas o no reportadas tienen un caudal mayor a 250 l/h con una presión de 50 mca, pero permanecen invisibles en la superficie debido a condiciones externas. Finalmente, las fugas de fondo son aquellas con caudales inferiores a 250 l/h y presiones por debajo de 50 mca. Por su pequeña magnitud, estas fugas suelen pasar desapercibidas y no se reparan hasta que el tramo completo es reemplazado. Estas pérdidas se deben principalmente a goteos en uniones, válvulas o accesorios no herméticos [32-34].

Es importante señalar que las pérdidas reales no se pueden eliminar completamente de los sistemas de abastecimiento [35].

Estrategias de control para reducir las pérdidas reales de los sistemas de distribución de agua urbana [2, 36] se observan en la figura 1, estas deben estar en balance para disminuir las pérdidas.

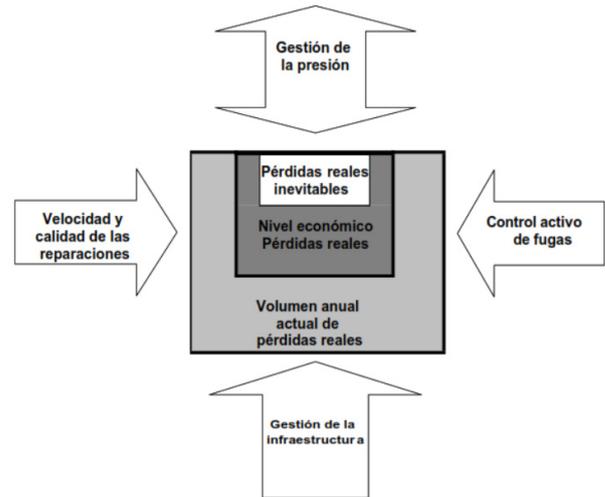
Las estrategias mostradas son de aplicación global y representan las denominadas “buenas prácticas”, en relación con la disminución de pérdidas de agua en las redes de distribución. Como primer paso para reducir las pérdidas de agua en las redes de distribución es necesario dividir la red en distritos hidrométricos reales, los cuales son áreas que permiten un manejo más rápido y fácil de todo el sistema en estudio [38].

### 1.2. GESTIÓN DE PRESIÓN

Se define como gestión de presión el manejo de presiones del sistema a niveles óptimos de servicio a la vez que se asegura un suministro eficiente y suficiente para usos normales [39].

**Figura 1.**

Metodología de reducción de pérdidas reales.



Nota. Adaptado de M. Farley, “Leakage management and control” [37].

La gestión de presión es fundamental como estrategia de reducción de fugas, según Charalambous [40], existe una relación física entre el caudal de fuga y la presión; por lo tanto, la frecuencia de roturas o estallidos también se encuentra en función de la presión [41-43]. Se dice que entre mayor es la presión, mayor serán las fugas por lo cual se debe asumir inicialmente una relación lineal entre cada una (la proporción de disminución de las fugas será igual a la proporción de disminución de la presión). Conforme se realicen los ajustes se obtendrá el porcentaje real de disminución [43, 44].

Cuando se reduce la presión, se debe asegurar que el punto crítico de la red tenga la presión mínima de suministro [45]. Generalmente las presiones de suministro de la red en horas de menor consumo son mayores a las presiones máximas permitidas, por lo cual se tiene un rango de aplicación de la regulación de la presión [46], es más práctico controlar la presión en las tuberías de distribución que realizar reparaciones de fugas (por costos y tiempos principalmente) [34].

### Control activo de fugas

El control activo de fugas implica la acción sistemática de identificación y cuantificación de las pérdidas por fugas existentes, en el sentido de localizar aquellas no visibles, a través de los métodos acústicos, y en ciertos casos basándose en la información proveniente de la monitorización continua de los flujos y presiones de los distritos hidrométricos reales. Este método, al contrario del control pasivo que espera a la fuga en hacerse visible, resulta en menor volumen perdido [30, 47, 48].

El control activo de fugas es importante para una gestión rentable y eficiente de las fugas, entre más rápido una empresa pueda analizar los datos de caudal de los distritos, más rápido podrá localizar las fugas. Por lo cual desde la fase de concepción es importante que las redes de distribución tengan en cuenta el mantenimiento, sectorización y recopilación de datos [40].

Otro indicador que se incluye dentro del control activo de fugas es el índice de caudal nocturno el cual se obtiene dividiendo el caudal mínimo nocturno y la demanda promedio diaria [49-51]. Este índice está vinculado a la zona en estudio y varía con el tiempo, indicando la posible existencia de problemas de fugas en el área. Cuando el índice de caudal nocturno se acerca a 1.0, la probabilidad de que haya fugas en la zona se incrementa [9].

### Gestión de la infraestructura

La gestión de todos los elementos de la red implica realizar un mantenimiento regular para asegurar un servicio óptimo y garantizar que los componentes se reemplacen puntualmente al final de su vida útil [52, 53]. Estas prácticas permiten gestionar las fugas de manera económica y sostenible a largo plazo. Comprender las pérdidas reales implica establecer medidas que van desde la reparación y sustitución hasta la rehabilitación o simples inspecciones, lo que facilita establecer prioridades y tomar decisiones adecuadas.

Los puntos críticos de este sistema incluyen la gestión eficaz de los sistemas de información, la recolección de datos y su conversión en información útil para la planificación, así como la evaluación del rendimiento actual de los activos.

### Rapidez y calidad de las reparaciones

Tiene como objetivo garantizar las reparaciones de forma oportuna y duradera [54]. El tiempo que se deja una fuga afecta directamente al volumen de pérdidas reales, mientras que la calidad de las reparaciones influye principalmente en la continuidad. Por lo cual la empresa prestadora de los servicios debe tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- Disponibilidad de equipos y materiales
- Procedimientos eficaces desde la alerta inicial hasta la reparación integral
- Financiamiento
- Normas adecuadas de materiales y mano de obra
- Conexiones a la red (acometidas) de alta calidad

En resumen, el efecto combinado de los métodos de intervención descritos ayuda a las empresas de suministro de agua a reducir y mantener las pérdidas reales de agua en relación con un balance económico.

## 1.2. PÉRDIDAS APARENTES

Las pérdidas no aparentes se refieren a las pérdidas ocasionadas por factores no físicos. Estas comprenden el agua entregada exitosamente al destino (usuario o cliente) pero que no se mide o registra con exactitud, causando un error en el valor del consumo de cada cliente. Las pérdidas de agua aparentes pueden generar grandes costos significativos de pérdidas para la empresa de suministro de agua especialmente, en las redes de distribución sin medidores y con muchas conexiones ilegales [39].

### Razones de las pérdidas aparentes

Las pérdidas aparentes se deben a varias causas principales. Una de las más comunes es la inexactitud de los medidores de agua [55]. Esto ocurre cuando un pequeño porcentaje del agua no se mide correctamente debido a errores de calibración o al desgaste natural de los equipos [56]. Los problemas se deben a factores como el uso de medidores de baja calidad, el sobredimensionamiento, la falta de calibración y el deterioro por el uso continuo [56, 57]. El rendimiento de un medidor depende tanto de factores internos, como la tecnología de medición y la calidad de fabricación, como de factores externos, tales como la calidad del agua, los sólidos en suspensión y la presión de la red [58].

Otra causa significativa es el manejo incorrecto de los datos, que a menudo proviene de errores cometidos por el personal encargado de leer los medidores [19]. Estos errores pueden surgir de la pérdida o alteración de los datos durante el proceso de registro o facturación. Además, el consumo no medido, como el utilizado en actividades públicas (limpieza de plazas, riego de parques, etc.), puede ser subestimado o sobreestimado, afectando directamente las cifras de producción de agua potable [59].

El consumo no autorizado es otra fuente importante de pérdidas aparentes. Este tipo de pérdida incluye fraudes o conexiones ilegales, como el vandalismo o la manipulación de medidores por parte de los usuarios. También abarca el uso no autorizado de agua a través de hidrantes callejeros u otras prácticas corruptas para acceder al suministro de agua [60-62].

En conjunto, estos factores contribuyen a una gestión ineficiente del agua potable y subrayan la importancia de mejorar tanto la precisión de los equipos de medición como la integridad de los procesos de recolección y manejo de datos. La prevención del consumo no autorizado también es crítica para reducir estas pérdidas y garantizar un uso más eficiente del recurso hídrico.

Estas prácticas ilegales pueden causar pérdidas económicas para las empresas de agua, así como afectar la calidad y cantidad del suministro para los usuarios legales [25].

## 2. MÉTODO

Se siguió la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar la transparencia y rigor en la búsqueda y selección de la literatura relevante. La búsqueda se realizó en tres bases de datos académicas: SciELO, Water Utility Journal y Scholar Google, los términos de búsqueda combinaron palabras clave relacionadas con los indicadores de desempeño propuestos por la IWA, incluyendo “pérdidas de agua”, “indicadores de desempeño”, “gestión del agua”, “WLTF” y “eficiencia del agua”. Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los estudios relevantes, estos son artículos publicados en revistas científicas revisadas por pares, tesis o pares, idioma inglés o español, textos que tengan un enfoque en los indicadores de desempeño propuestos por IWA WLTF y propongan algún análisis de métodos de intervención para reducir las pérdidas de agua reales y aparentes (ver Figura 2).

Los criterios de exclusión fueron trabajos duplicados, estudios con objetivos no relacionados con las pérdidas de agua o los indicadores de desempeño, artículos en idiomas distintos al inglés o español, trabajos que no analizan métodos de intervención para la reducción de pérdidas de agua.

Se analizan indicadores, métodos de evaluación, y de prevención, así como análisis de fugas en redes de distribución, para lo cual se utiliza técnicas bibliométricas para apoyar el análisis, incluyendo Bibliometrix y herramientas de minería de texto como VOSviewer [63-65] y una bitácora de revisión para extraer y analizar información [66].

**Figura 2.**

Metodología PRISMA.



Se realizó un análisis cualitativo de los 22 documentos seleccionados (16 artículos, 3 tesis, 3 libros y 2 manuales) para identificar y extraer información relevante sobre los indicadores de desempeño y los métodos de intervención para la reducción de pérdidas de agua.

Se analizan casos de estudio presentes en artículos y tesis, identificando un total de 136 documentos que abordan indicadores de eficiencia en la reducción de pérdidas.

Este análisis proporciona criterios que permiten seleccionar el método de intervención más adecuado, basado en experiencias comprobadas.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 MÉTODOS DE INTERVENCIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

En la tabla 2 se puede observar los métodos más representativos encontrados en cuanto a la reducción de pérdidas en las redes de distribución de agua

#### 3.1.1 Gestión de presión

Es fundamental limitar la presión y minimizar su rango de variación para cumplir con los estándares de servicio establecidos. Una red de distribución de agua cuando opera con una presión adecuada presenta varios resultados beneficiosos como se puede observaren la Tabla 3.

La sectorización de la red de distribución suele ser un paso previo esencial antes de aplicar otras medidas de control de presión. Entre las principales soluciones se encuentran los tanques rompe-presión, bombas de velocidad variable y, principalmente, las válvulas reductoras de presión, que se colocan en puntos estratégicos definidos por los distritos hidrométricos. Una gestión eficiente de la presión no solo optimiza el funcionamiento del sistema, sino que también extiende la vida útil de sus componentes al minimizar el estrés causado por presiones elevadas.

#### 3.1.2. Control activo de fugas

El control activo de fugas es el método más tradicional e intuitivo. Requiere equipo especializado en la detección como un acústico integrado por sensores de detección de ruido, un registrador y un software de análisis. El análisis espectral del ruido ofrece resultados fiables y no requiere personal altamente cualificado. Sin embargo, presenta desventajas como el alto costo de los equipos y la dependencia de los materiales de las tuberías, que pueden afectar la precisión del análisis. Una opción más avanzada es el correlador, que utiliza dos sensores colocados a cierta distancia sobre la tubería. Cuando se detecta ruido de fuga, el correlador calcula su ubicación analizando el tiempo que tarda el sonido en llegar a ambos sensores.

#### 3.1.3. Gestión de la infraestructura

Un mantenimiento adecuado de la red de distribución y la reparación eficaz de fugas no visibles y semivisibles contribuyen a disminuir el índice de agua no contabilizada. De este modo, se asegura un suministro eficiente de agua potable a la población, manteniendo las redes en buen estado.

**Tabla 2.**

Métodos de intervención para la reducción de pérdidas de agua en redes de distribución

Método	Descripción	Observación	Bibliografía
De sectorización	La finalidad es dividir (sectorizar) la red de distribución de agua potable de manera geográfica, teniendo en cuenta la red primaria y secundaria para el control de caudales	Programas que mejor trabajan con el método: EPANET, GIS	[13, 66-69]
De volumen total	Realiza un balance hídrico y contabiliza el volumen enviado y el volumen facturado	Es conveniente realizar balance hídrico general, y realizar visualización general en GIS para definir sectores de estudio	[70-72]
Método de intervención por mantenimiento	Se revisa los costos de facturación vs. Los costos de reparación y en función de la falla se instala accesorios o se cambia materiales, haciendo una proyección para disminuir los costos de reparación. La comparación anual tiene una tendencia a la baja o a la alta	Sólo puede ser trabajado cuando hay fallas o fugas detectadas. El levantamiento del sistema total es un costo alto que no se contempla. La inspección visual es la principal manera de detectar deterioro de red o fugas de agua	[2, 73]
Gestión de presión	Asegura una presión de operación mínima durante las 24 horas del día en todos los puntos de la red.  La gestión de la presión, en el punto de interés (punto crítico PC), varía a lo largo del día en función de los periodos de alto consumo o de bajo consumo (correspondiente a las presiones altas durante la noche y bajas durante el día).	WaterCAD, resulta muy conveniente para trabajar el método de gestión de presión.  Utilizando la gestión de presión, se puede mantener la presión del punto crítico constante a la mínima requerida, evitando las fluctuaciones y fatiga de los materiales.	[67, 70, 74]
Métodos de jerarquías analíticas	Estructurar un problema multicriterio en forma visual, construyendo y comparando pares - criterios - alternativas. Se da pesos de valor a cada criterio construyendo vectores de priorización y matrices conceptuales.	Los programas más usados para trabajar el método son EPANET, GIS, WaterCAD	[4, 75-77]
Método del gradiente hidráulico	Permite el análisis hidráulico de redes de agua, determinando las presiones en diversos puntos del sistema, así como los caudales, velocidades, pérdidas en las líneas que conforman la red hidráulica.	Los programas más usados para trabajar el método son EPANET, GIS, WaterCAD	[2, 3, 78, 79]
Método Control activo de fugas	Refiere a la localización de roturas o fallas menores que no son evidentes ni detectadas por los prestadores de servicio, los usuarios, o los ciudadanos.  Consiste en cuatro etapas:  1. Detección de la existencia de una fuga 2. Localización de la fuga 3. Confirmación visual de la fuga 4. Reparación	La detección de fugas generalmente se realiza mediante registradores acústicos, que combinan sensores de ruido, un dispositivo de registro y software de análisis. Este equipo emite una señal acústica durante dos horas diarias; una señal con baja dispersión indica que la fuga está distante, mientras que una señal con alta dispersión señala que la fuga está más cerca.  La localización de fugas puede realizarse con varillas acústicas, compuesto por un sensor piezoeléctrico, un amplificador y auriculares inyección de gas inofensivo.	[33, 80-83].

Método	Descripción	Observación	Bibliografía
Balance hídrico nocturno		Se mide el consumo nocturno con caudalímetros y comparando los resultados con los estándares técnicos establecidos	[15, 84-86]
Gestión de infraestructura	Rehabilitación y/o renovación de las tuberías mediante un análisis multicriterio.	Estas reparaciones de fugas se dan primordialmente en: Collarines Tuberías de acometidas Llaves de corte Neplos Uniones Fugas en accesorios de unión Válvulas, entre otras.	[87-90]
Velocidad y calidad de las reparaciones	Minimiza el tiempo desde que se tiene conocimiento de la existencia de la fuga hasta su reparación completa.	Una gestión efectiva de las reparaciones de fugas implica los siguientes aspectos: 1. Comunicación fluida con los clientes. 2. Control activo de fugas no visibles, llevado a cabo por equipos bien entrenados y equipados, ya sean propios o contratados. 3. Un sistema de programación y control que facilite las tareas diarias del mantenimiento, generando hojas de ruta para los equipos y permitiendo el procesamiento eficiente de datos en el campo. 4. Un sistema de gestión y control de resultados que incluya la reducción de pérdidas reales y otros indicadores relevantes.	[1, 91-93]
Reducción de errores de medición	Mediante el uso del medidor residencial, usa parámetros metrológicos que permiten la caracterización de los distintos aspectos de funcionamiento.	Relaciona los siguientes parámetros: volumen real, caudal real, volumen medido, como la diferencia entre la lectura final y la lectura inicial del medidor. Error de medición absoluto, es la diferencia entre el volumen medido y el volumen real. Curva de error del medidor. La curva de error del medidor depende principalmente de la tecnología de medición del medidor y de la clase metrológica.	[57, 94-96]
Combate a los fraudes y conexiones clandestinas	Consiste en detectar el fraude, o robo del agua potable.	Las conexiones clandestinas se pueden clasificar de la siguiente manera: <b>Grupo 1:</b> Incluye las conexiones ilegales que ocurren de manera fortuita, donde el acceso al agua no es viable, generalmente debido a restricciones legales. <b>Grupo 2:</b> Se refiere a las reconexiones del servicio cuando este ha sido interrumpido o deshabilitado. <b>Grupo 3:</b> Comprende las modificaciones o alteraciones realizadas en los equipos de medición de agua.	[57, 97-99]

**Tabla 3.**

Beneficios obtenidos de un buen manejo de la presión

Gestión de presión: reducción de presiones promedio y máximos en exceso					
Beneficios para la conservación		Beneficios para la empresa de agua		Beneficios para el cliente	
Fugas reducidas		Frecuencia de estallidos y fugas			
Consumo reducido	Caudales reducidos de fugas y estallidos	Costos de reparación reducidos en las troncales	Renovaciones diferidas y mayor vida de activos	Costo reducido del control activo de fugas	Menos quejas de clientes
					Menos problemas en las tuberías y aparatos de los clientes

### 3.1.4. Rapidez y calidad de las reparaciones

Como resultado, se obtienen beneficios significativos que ayudan a reducir el índice de agua no contabilizada y a gestionar este recurso de manera eficiente. Entre los principales beneficios destacan la prevención del desperdicio, que permite conservar agua y generar ahorros económicos; y la mejora de la calidad del agua, ya que al evitar fugas, se minimiza el riesgo de que contaminantes ingresen al suministro, protegiendo así la salud pública.

### 3.1.5. Reducción a los errores de medición

Es fundamental identificar los medidores dañados, ya que los operarios elaboran informes mensuales que notifican al propietario sobre las fallas y la necesidad de reemplazo, el cual puede ser financiado por la empresa o adquirido por el usuario. Este registro es esencial para el proyecto, ya que los medidores defectuosos contribuyen a pérdidas comerciales de agua al subestimar el consumo real. Para calcular el volumen total de agua perdida por errores de medición, se pondera el patrón de consumo de los usuarios y se multiplica por el error global de los medidores.

### 3.1.6. Combate a los fraudes y conexiones clandestinas

El combate a los fraudes y conexiones clandestinas es una tarea importante para garantizar la transparencia y la legalidad en diferentes ámbitos, en las empresas y en la sociedad en general. Se puede considerar aspectos positivos como ahorro del recurso agua entregando el suministro a familias que en verdad lo requieran, detección de redes antes del contador y reducción de ilegalidades.

En la tabla 4, se presenta un conjunto de medidas específicas para contrarrestar el agua no facturada con sus respectivos componentes

## 3.2. INDICADORES DE MÉTODOS DE PREVENCIÓN Y ANÁLISIS DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Los indicadores más importantes encontrados en cuanto a pérdidas aparentes se pueden observar en la tabla 5

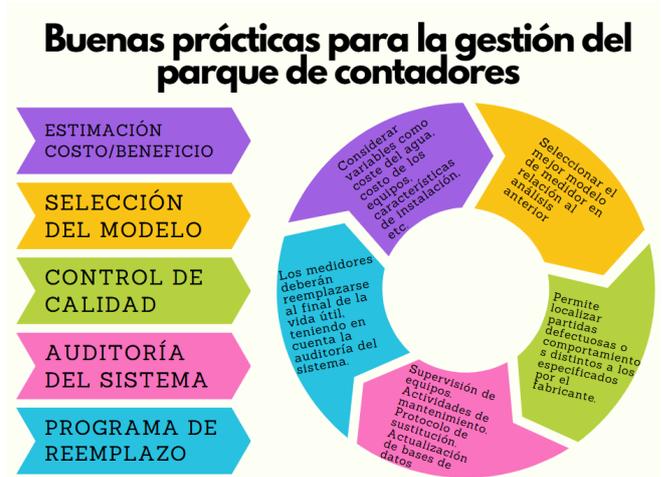
Los indicadores más importantes encontrados en cuanto a pérdidas reales se pueden observar en la tabla 6.

Para gestionar indicadores de métodos de prevención y análisis de fugas en redes de distribución, se requiere un buen control de medición y contabilización de agua, por lo que se contempla en este trabajo buenas prácticas para la gestión del parque de contadores.

Un mantenimiento adecuado del catastro de usuarios tiene impactos positivos en las empresas de agua, en cuanto a su distribución y facturación, evitando bajos niveles de recaudación, servicio deficiente y dificultad para ampliar el mercado. En la figura 3 se observa buenas prácticas para la gestión del parque de contadores.

**Figura 3.**

Buenas prácticas para la gestión del parque de contadores.



Nota: Adaptado de Ziegler, Sorg, Hübschen, Fallis, Happich, y Baader, *Guía para la reducción de las pérdidas de agua* [39].

El catastro de usuarios es crucial para optimizar el porcentaje de pérdidas, ya que facilita la correcta comercialización de los servicios de abastecimiento de agua y otros procesos relacionados entre el sistema, la empresa, el usuario y el recurso. Además, permite identificar oportunidades de expansión y desarrollar estrategias para captar nuevos usuarios. Sin un catastro actualizado, la gestión comercial, incluyendo la medición, facturación, cobranza y comercialización, se vuelve ineficiente, afectando

**Tabla 4.**

Métodos para combatir fraudes y conexiones clandestinas

Componente	Medidas para contrarrestar
Consumo autorizado no facturado	Aumentar valores por cobranza Minimizar consumo autorizado por la empresa Minimizar la cantidad de clientes no facturados
Inexactitudes en la conexión	Establecer población de medidores Probar exactitud de medidores regularmente Programar mantenimiento
Errores de lectura de medidores y transferencia de datos	Analizar registros de facturación buscando patrones de consumo inusuales Auditar muestras de cuentas sospechosas Cambiar a lectura automática de medidores
Errores de manejo de datos	Flujograma del proceso de facturación Análisis del proceso de facturación Ajustar correctamente los datos de consumo Mejorar el manejo de cuentas
Consumo no autorizado	Inspecciones en medidores que han sido manipulados Penalizar la mala utilización de hidrantes y otras formas de consumo ilegal
Fuga desde estallidos y roturas detectables	Realizar campañas para reparar acumulación de roturas de tubos reportada/visible Reducir número de estallidos y fugas implementando gestión de presión Reducir tiempo de ocurrencia de fugas introduciendo monitoreo continuo en la red y mejorando el control activo de fugas
Fuga de fondo	Implementar gestión de presión Desarrollar estrategia de rehabilitación de largo plazo

Nota. Adaptado de Ziegler, Sorg, Hübschen, Fallis, Happich y Baader, *Guía para la reducción de las pérdidas de agua* [39].

**Tabla 5.**

Indicadores de Métodos de prevención y análisis de fugas en redes de distribución para pérdidas aparentes

Indicador	Observación	Método de cálculo	Bibliografía
Máxima pérdida aparente aceptable "litros/conexión/día"	Válido para sistemas con más de 3.000 habitantes	$ILI = \frac{CARL}{UARL}$  Donde: CARL: representan las pérdidas físicas anuales reales y UARL el límite teórico inferior de pérdidas físicas	[12, 16, 33]
Estimación del Índice de Pérdidas por Infraestructura, IPI "litros/medición correcta/día"	Densidad de conexión, es preferible trabajar mediante sectorización	Ficha de recolección de datos y cálculo de densidad de red funcional	[16, 24, 100, 101]
Porcentajes de agua entregada	Diferencia entre la cantidad ingresada al sistema y el consumo autorizado	Expresado en porcentaje  $Agua\ no\ contabilizada = caudal\ distribuido - caudal\ facturado$  $Índice\ de\ agua\ no\ contabilizada = (caudal\ distribuido - caudal\ facturado) / caudal\ distribuido$	[12, 23-25]

negativamente la economía de la empresa. Esta relación cercana del catastro con todos los procesos antes mencionados puede apreciarse en la Tabla 7.

### 3.3. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS, CONSIDERANDO INDICADORES DE EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS, EN BASE A CASOS DE ESTUDIO

Se ha realizado un análisis bibliográfico de casos de estudio considerando el uso de métodos y los indicadores de eficiencia utilizados. En la tabla 8 se puede apreciar el análisis. En la figura 4 se observa la ubicación de los casos de estudio seleccionados, se puede decir que los métodos estudiados y sus indicadores de eficiencia son de uso y conocimiento general a nivel mundial, se debe señalar que la bibliografía buscada fue en español e inglés.

## 4. CONCLUSIONES

Estas medidas son cruciales para prevenir pérdidas económicas considerables y asegurar la sostenibilidad del servicio de agua potable. El análisis de los indicadores de gestión de pérdidas de agua demuestra que su aplicación es fundamental para las empresas de servicios públicos y organismos encargados de la gestión hídrica, garantizando tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad del recurso.

El monitoreo continuo y el análisis sistemático de estos indicadores aportan información clave para la toma de decisiones estratégicas. Esto permite identificar áreas de alto riesgo de pérdidas, mejorar la infraestructura y mitigar las fugas, favoreciendo la conservación del agua para futuras generaciones y reduciendo los costos operativos.

El presente estudio subraya que este tema no ha sido suficientemente explorado en América Latina. Las metodologías propuestas provienen principalmente de experiencias en Europa y Asia, lo que destaca la necesidad de realizar más investigaciones enfocadas en la realidad y las necesidades específicas de Latinoamérica.

## DISCUSIÓN

Se ha realizado una revisión bibliográfica preliminar sobre métodos de intervención clave para la reducción de pérdidas de agua en redes de distribución, cumpliendo así el objetivo del estudio. Los principales hallazgos presentan un panorama de los métodos más efectivos, sirviendo como base para estudios experimentales que permitan validar o descartar técnicas en contextos específicos.

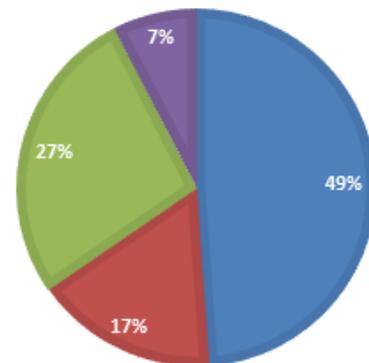
El estudio destaca el control de presión como el método más común en la gestión de fugas. Sin embargo, cada región tiene características particulares, como topografía, clima, y urbanización, entre otras, que justifican la necesidad de adaptar y evaluar soluciones específicas para maximizar su eficacia. Estos hallazgos respaldan la revisión

**Figura 4.**

Ubicación geográfica de los casos de estudio analizados.

### UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CASOS DE ESTUDIO ANALIZADOS

■ América Latina ■ EEUU ■ Unión Europea ■ Otras localidades



bibliográfica, que concuerda con estudios de caso existentes y valida el uso de indicadores para evaluar pérdidas aparentes y reales.

Las conclusiones subrayan la importancia de planificar el mantenimiento y monitorear cuidadosamente las redes de distribución, incluyendo sus componentes hidrosanitarios y tuberías subterráneas, cuya localización precisa es esencial para una gestión efectiva de fugas.

La revisión también destaca la dispersión de información bibliográfica y la falta de claridad en el uso de ciertos indicadores, los cuales se eligen con frecuencia en función de la disponibilidad de datos en las áreas estudiadas.

Esta revisión bibliográfica ofrece un marco inicial para entender la gestión de pérdidas de agua, proponiendo buenas prácticas y métodos de recolección de datos que van más allá de la simple gestión de medidores. Se enfatiza la necesidad de investigaciones prácticas que analicen casos específicos y verifiquen la efectividad de los indicadores en diferentes regiones.

Se recomienda que futuras investigaciones exploren más a fondo el análisis de indicadores de gestión de pérdidas de agua y cómo estos pueden ayudar a las empresas de agua a implementar estrategias preventivas y correctivas para mejorar la eficiencia del recurso. El documento destaca los beneficios de estos indicadores, como el control de presión, la detección temprana de fugas y la rehabilitación de infraestructura, sugiriendo su integración en proyectos hidráulicos para optimizar la distribución y minimizar el desperdicio de agua.

La gestión de presión se considera la intervención más eficiente, ya que no solo incrementa la eficacia del sistema, sino que también reduce el desgaste de materiales, especialmente en redes antiguas. Controlar la presión y minimizar las fluctuaciones ayuda a prevenir roturas de tuberías, contribuyendo a una distribución sostenible y a

un mejor aprovechamiento del recurso hídrico. Además, estrategias para identificar fugas no visibles mediante inspecciones regulares permiten corregir problemas rápidamente, reduciendo las pérdidas de agua.

## REFERENCIAS

- [1] M. Ramos Joseph and A. J. J. I. H. y. A. León Méndez, "Gestión integral de pérdidas de agua: un caso de estudio," vol. 37, no. 3, pp. 74-88, 2016.
- [2] M. J. Barrera Chaupis, "La gestión del mantenimiento y la reducción de las fugas no visibles de la red de agua potable en el distrito de San Martín de Porres-Lima", 2020.
- [3] H. Guerra Puente, "Verificación de la reducción de pérdidas físicas en una red de distribución de agua potable mediante la simulación hidráulica de presiones en un distrito hidrométrico de la red del Área Metropolitana de Monterrey", Universidad Autónoma de Nuevo León, 2021.
- [4] W. Hope and J. Bircumshaw, "The waste of water in public supplies, and its prevention. (reprint of paper originally published in minutes of the (ice) proceedings, vol 110, part 4, session 1891-1892, pp. 260-275)", in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, 1996, vol. 115, no. 2, pp. 68-75: Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- [5] M. C. Romero *et al.*, "La eficiencia en los sistemas de distribución: revisión sobre la gestión del agua no registrada. Coordinador", 2014.
- [6] W. B. Desalegn, "Water supply coverage and water loss in distribution systems: The case of Addis Ababa", 2005: ITC MSc thesis, Enschede, The Netherlands.
- [7] Y. Kizmaz, "Losses and leakages in drinking water distribution systems", Hasan Kalyoncu Üniversitesi, 2020.
- [8] M. A. E. Tshimbalanga, "Real water loss within water distribution networks of the Tshwane Metropolitan City in South Africa", University of Johannesburg, 2022.
- [9] E. Kong Vargas, "Eficiencia física de la red de agua potable como factor de resiliencia en fraccionamientos de la ciudad de Chihuahua", Universidad Autónoma de Chihuahua, 2022.
- [10] L. A. Gutiérrez Sánchez, "Estudio de los impactos ambientales del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Jipijapa, Manabí, Ecuador," 2011.
- [11] A. Jouravlev, *Los servicios de agua potable y saneamiento en el umbral del siglo XXI*. CEPAL, 2004.
- [12] J. L. Mendoza Mendoza, "Beneficios ambientales de la reducción de pérdidas de agua potable en la red de distribución circuito R-20 Sabandía-Arequipa 2019", 2021.
- [13] M. P. Monsalve Monrroy and J. A. Uribe Gómez, "Programa de reducción de pérdidas de agua en la red de distribución del sistema de acueducto del municipio de San Gil", ed. Universidad Pontificia Bolivariana, 2013.
- [14] A. Salazar Adams and A. N. J. R. y. s. Lutz Ley, "Factores asociados al desempeño en organismos operadores de agua potable en México", vol. 27, no. 62, pp. 05-26, 2015.
- [15] D. Pearson, *Definiciones estándar de pérdidas de agua*. IWA Publishing, 2019.
- [16] C. Espinosa-Jiménez, M. A. Pérez-Montilla, and M. E. J. C. e. I. Medina-Padilla, "Indicadores de gestión en sistemas de abastecimiento de agua potable. Experiencia internacional y la realidad en Venezuela", vol. 40, no. 3, pp. 297-301, 2019.
- [17] E. J. Facundo Lozano and J. L. Oliva Caffo, "Control de presiones de agua potable para el mejoramiento del sistema a través de la metodología de sectorización en el distrito de Chocope", 2020.
- [18] D. J. V. González, L. G. de Marcos, and R. S. Calvo, "Diseño de maniobras de gestión de presiones en sectores de distribución de agua y análisis de su impacto", Universidad Politécnica de Madrid Madrid, Spain, 2017.
- [19] A. E. Ilaya Ayza, "Metodología para la gestión de horarios de suministro en sistemas de abastecimiento intermitente, caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia)", 2015.
- [20] P. A. López, A. F. Vela, and P. L. J. I. d. a. Iglesias, "Análisis de seguridad en abastecimientos y su aplicación a la detección de fugas", vol. 2, no. 3, pp. 7-22, 1995.
- [21] N. V. Achache Carrillo and S. A. Gómez Monar, "Incidencia de fugas en la red de abastecimiento de agua potable del cantón Riobamba", Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2022.
- [22] S. de Servicios Sanitarios and S. Cesmec, "Control Paralelo de Agua Potable 2018-Norte. Grupos TD\_4, TD\_5 y TD\_6", 2018.
- [23] J. N. Baires Orantes, M. E. Coto Portillo, and D. L. Torres Delgado, "La agenda política salvadoreña y los compromisos adquiridos en el tratado marco de de seguridad democrática, en el combate a la corrupción y la inseguridad, periodo 2009-2013", Universidad de El Salvador, 2013.
- [24] J. A. Fernández Cotera, "Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico en variación de pendiente topográfica, Santa Rosa, Lima, 2021", 2021.
- [25] M. E. Franch Mañas, "Las conexiones irregulares en asentamientos informales en España en el contexto de la pobreza energética severa", 2022.
- [26] M. M. Mahdavi, K. Hosseini, K. Behzadian, A. Ardehsir, and F. Jalilsani, "Leakage control in water distribution networks by using optimal pressure management: A case study", in *Water Distribution Systems Analysis 2010*, 2010, pp. 1110-1123.
- [27] J. R. Stokes, A. Horvath, R. J. E. Sturm, and technology, "Water loss control using pressure management: Life-cycle energy and air emission effects", vol. 47, no. 19, pp. 10771-10780, 2013.
- [28] S. R. Santisteban Meza and H. Zuñiga Choquehuanca, "Las pérdidas operativas y comerciales del servicio de

- agua potable y su incidencia en los resultados económicos de la EPS Sedacusco sa periodo 2013-2017”, 2018.
- [29] A. V. Tirado Díaz, “Reducción de pérdidas de caudal en red de tuberías para mejorar la distribución de agua potable en el distrito de Celendín 2021”, 2021.
- [30] A. Vela, F. Martínez, J. García-Serra, and R. J. I. d. a. Pérez, “Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento”, vol. 1, no. 1, pp. 35-54, 1994.
- [31] M. Herrera, A. Karatzoglou, S. Canu, J. Izquierdo, and R. J. P. d. I. S. I. d. A. d. A. Pérez-García, SEREA, “Clusters de abastecimiento de agua basados en aprendizaje semi-supervisado”, vol. 9, 2009.
- [32] P. de la UNAM, “Facultad de Ingeniería,” Universidad Nacional Autónoma de México.
- [33] U. Montes Yaroniza, “Determinación de los diámetros óptimos de tuberías con el fin de uniformizar el estado de presiones. Zona de Miraflores-ciudad de Ayacucho”, 2019.
- [34] O. H. Porras Gómez, “Reducción de pérdidas de caudal en red de tuberías para mejorar distribución de agua potable-Sector San Carlos-La Merced”, 2014.
- [35] I. W. Association, *Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: método pormenorizado de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo*. Organización Mundial de la Salud, 2009.
- [36] R. A. Coello Montoya, “Análisis energético y estrategias de optimización para el sistema de abastecimiento de agua potable de los sectores Virgen del cisne y 25 de Julio de la ciudad de Guayaquil (Ecuador)”, 2022.
- [37] M. Farley, S. Water, W. Supply, S. C. Council, and W. H. Organization, “Leakage management and control: a best practice training manual”, World Health Organization 2001.
- [38] F. Salguero, R. Cobacho, and M. Pardo, “Sectorización de redes de distribución de agua según criterios de eficiencia energética”, ed: Universidad Politécnica de Valencia. España, 2017.
- [39] D. Ziegler *et al.*, “Guía para la reducción de las pérdidas de agua: Un enfoque en la gestión de la presión”, vol. 1, 2011.
- [40] B. Charalambous, D. Foufeas, and N. J. W. U. J. Petroulias, “Leak detection and water loss management”, vol. 8, no. 3, pp. 25-30, 2014.
- [41] A. D. de Santi, T. B. Cetrulo, and T. F. J. W. S. Malheiros, “Water loss control practices in developing countries: a case study of a Brazilian region”, vol. 21, no. 2, pp. 848-858, 2021.
- [42] F. González-Gómez, M. A. García-Rubio, and J. J. W. R. D. Guardiola, “Why is non-revenue water so high in so many cities?”, vol. 27, no. 02, pp. 345-360, 2011.
- [43] J. R. Stokes, A. Horvath, and R. Sturm, “Supporting Information for Water Loss Control Using Pressure Management: Life-cycle Energy and Air Emission Effects”.
- [44] C. León Celi, “Optimización del reparto de caudales de suministro de redes malladas de distribución de agua por bombeo con varias fuentes de abastecimiento”, 2016.
- [45] G. R. J. R. R. t. d. m. a. Arzuaga, “Gestión dinámica de la presión en la red de abastecimiento. Presente y futuro”, vol. 33, no. 220, pp. 98-103, 2020.
- [46] P. Garzón Contreras and J. J. I. s. y. a. Thornton, “Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución”, pp. 33-37, 2006.
- [47] A. J. B. V. e. S. d. D.-O. Lavell, “Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición”, vol. 4, pp. 1-22, 2001.
- [48] S. X. Molina Arce, “Metodología para reducción de pérdidas técnicas en el sistema de distribución de aa. pp. del suburbio oeste de la ciudad de Guayaquil”, 2009.
- [49] J. A. Huamán Garcia, “Propuesta de control de distribución para mejorar el abastecimiento de agua potable en la localidad de Paita”, 2019.
- [50] R. D. Huancahuari Arimana, “Análisis de fugas en redes secundarias para mejorar la red de distribución de agua potable, San Martín de Porres, 2018”, 2018.
- [51] Y. Villagómez Velázquez and E. J. R. y. s. Gómez Martínez, “Los recursos hídricos en las regiones indígenas de México”, vol. 32, 2020.
- [52] Y. A. Loaiza Bedoya and A. L. Osorio Montoya, “Gestión del agua en el sector de la ganadería bovina en la cuenca río la Vieja departamentos de Quindío y Risaralda”, 2009.
- [53] J. D. Oliva España, “Diseño de sistema de riego por goteo automatizado utilizando una placa programable Raspberry PI Pico y módulo ESP8266, en la finca Moralfa, departamento de Quetzaltenango, municipio de Coatepeque”, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2023.
- [54] R. J. W. Pilcher, “Leak detection practices and techniques: a practical approach”, pp. 44-45, 2003.
- [55] S. P. de Agua Potable, “Maestría en Administración de Empresas de Base Tecnológica”.
- [56] L. F. Jiménez Ormeño, “Factores que influyen en la calidad de precisión en la medida de energía en contadores electromecánicos”, 2014.
- [57] C. Jaramillo Martínez, M. E. Pacheco Valencia, and R. D. Velasco Morales, “Plan para la reducción del Índice de Agua No Contabilizada-IANC-apoyado en un modelo de gobierno de Ti (tecnologías de la información) para la empresa Aguas de Barrancabermeja SAESP”, Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible Virtual, 2021.
- [58] A. C. Solé, *Instrumentos industriales: Su ajuste y calibración*. Marcombo, 2009.
- [59] L. A. Jiménez Rodríguez, “Metrología industrial, sistemas de medición y aseguramiento metrológico: conceptos fundamentales”, 2007.
- [60] L. A. Diaz Manrique, “Agua no facturada y la gestión comercial en Sedachimbote SA, Áncash, 2022”, 2022.
- [61] D. A. Martínez Blandón, “Las conexiones ilegales del sistema de acueducto y sus efectos sobre las laderas de los sectores del Aguacate y Barrio Andes de la Ciudad de Manizales”, 2017.

- [62] J. S. Mendivelso Alarcón and L. C. Corredor Herrera, "Apoyo técnico en el programa IANC (índice de agua no contabilizada), en el municipio de La Mesa Cundinamarca", 2021.
- [63] H. Arruda, E. R. Silva, M. Lessa, D. Proença Jr, and R. J. J. o. t. M. L. A. J. Bartholo, "VOSviewer and bibliometrix", vol. 110, no. 3, p. 392, 2022.
- [64] M. Furness, R. Bello-Mendoza, J. Dassonville, and R. J. J. o. C. P. Chamy-Maggi, "Building the 'bio-factory': A bibliometric analysis of circular economies and life cycle sustainability assessment in wastewater treatment", vol. 323, p. 129127, 2021.
- [65] I. J. E. Passas, "Bibliometric analysis: the main steps", vol. 4, no. 2, 2024.
- [66] H. J. R. C. d. O. y. G. Gaitán, "Bitácora", vol. 55, no. 1, pp. 7-8, 2004.
- [67] M. A. Guarnizo Paz and A. T. Sánchez Ponce, "Reducción de pérdidas de agua potable mediante el método de sectorización en el distrito de Salaverry, departamento la libertad", 2019.
- [68] M. G. Cabrera Puga, "Análisis a largo plazo del nivel económico de pérdidas reales y aparentes en redes de distribución de agua. Desarrollo de una herramienta de cálculo y ejemplo de aplicación", 2019.
- [69] M. Denardi, J. Bianchotti, V. Williner, and V. J. A. Verrochi, "Sectorización y gestión de presión en redes de agua: evaluación y comparación de estrategias para reducir fugas de fondo", no. AJEA 38, 2024.
- [70] A. M. Usnayo Catunta, "Estudio del impacto económico generado por la gestión de la presión de servicio en la red de abastecimiento de agua potable, Sector Nueva Asunción de la Ciudad de El Alto".
- [71] J. A. Chávez Sánchez, "Estimación del agua potable no facturada en el sistema de distribución de las urbanizaciones Cajamarca y Ramón Castilla, Cajamarca 2021", 2022.
- [72] J. Godinez-Benavides, "Disponibilidad del recurso hídrico en la subcuenca del río Corredores para establecer un mecanismo de control en el aprovechamiento del caudal disponible, mediante un balance hídrico superficial e integrado", 2018.
- [73] J. J. Déniz Mayor and M. C. Verona Martel, "Deconstruyendo el resultado contable convencional para diseñar un resultado contable ambiental", *Contaduría y Administración*, vol. 60, no. 3, pp. 535-555, 2015/07/01/ 2015.
- [74] D. M. Hughes, *Assessing the future: Water utility infrastructure management*. American Water Works Association, 2002.
- [75] X. V. Delgado Galván, "Aplicación del método de jerarquías analíticas (AHP) a la gestión de pérdidas de agua en redes de abastecimiento", Universitat Politècnica de València, 2011.
- [76] Y. Dong, Y. Xu, H. Li, and M. J. E. J. o. O. R. Dai, "A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP", vol. 186, no. 1, pp. 229-242, 2008.
- [77] E. Urmeneta and J. M. J. E. d. e. a. Jiménez, "Problemas de gran tamaño en el proceso analítico jerárquico", vol. 8, pp. 25-40, 1997.
- [78] L. K. Aranea Cercado and L. E. Segovia Anchundia, "Modelización física y analítica de identificadores hidráulicos y económicos para evaluar pérdidas de agua en redes para agua potable", Guayaquil: ULVR, 2020., 2020.
- [79] A. E. Ilaya Ayza, "Propuesta para la transición de un sistema con suministro de agua intermitente a suministro continuo", Universitat Politècnica de València, 2016.
- [80] B. R. Cahuana Enriquez, "Análisis y determinación de agua no contabilizada en pérdidas operativas y comerciales, en el sistema de abastecimiento de agua potable zona III EPS Sedacusco SA", 2019.
- [81] D. V. M. R. Muñoz, "CERTIFICA", Universidad Técnica Particular de Loja, 2009.
- [82] J. N. Pérez and X. V. D. J. J. E. L. C. Galván, "Localización de fugas en redes de agua potable", vol. 4, no. 1, pp. 2869-2873, 2018.
- [83] N. R. Moreno, X. V. D. Galván, J. d. J. M. Rodríguez, and G. C. J. I. Aguilera, "Localización de fugas en redes de distribución de agua mediante optimización con Harmony Search", vol. 47, no. 4, pp. 108-114, 2022.
- [84] I. Campaña Soler, "Estudio de validación, corrección y almacenamiento de datos de los caudalímetros de la red de distribución de agua de Terrassa", Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [85] A. V. D. Christian and B. M. H. Manuel, "Titulación de Ingeniero Civil".
- [86] M. J. Mena Céspedes, "Diseño de la red de distribución de agua potable de la parroquia El Rosario del cantón San Pedro de Pelileo, provincia de Tungurahua", Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2016.
- [87] C. D. Alonso Guzmán, "Programación óptima de la renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano: Análisis de los factores de influencia", 2012.
- [88] M. Á. Pardo Picazo, "Influencia de los costes del Agua y la Energía en la renovación de tuberías", Universitat Politècnica de València, 2010.
- [89] O. A. Ruelas Coaguila, "Propuesta de un Plan de Gestión de Renovación de Redes de Agua Potable en el Distrito de Cerro Colorado-Arequipa", 2017.
- [90] D. A. Salazar-Molano, "Matriz multicriterio para la toma de decisiones en la instalación de tuberías generales de alcantarillado mediante los métodos sin zanja ya zanja abierta", 2022.
- [91] B. J. C. Ferrer-Jiménez and Futuro, "Mantenimiento preventivo en reductor de velocidad de grúas indias de extracción de mineral", vol. 5, no. 1, pp. 68-89, 2015.
- [92] R. R. Rivera, *Mantenimiento correctivo y reparación de redes de distribución de agua y saneamiento. ENAT0108*. IC Editorial, 2017.
- [93] P. D. Velásquez Vela, "Prototipo de un sistema de

- telemetría para la medición de agua potable residencial utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN”, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2023.
- [94] A. S. Benítez Camacho, “Programa para la reducción de pérdidas del suministro de agua potable de la empresa de servicios públicos de Paipa SAS Red Vital ESP”, 2022.
- [95] V. Bourguett Ortiz and L. Ochoa Alejo, “Reducción integral de pérdidas de agua potable,” ed: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología Hidráulica, 2001.
- [96] L. V. Parra Pérez, “Formulación de estrategias para la reducción de pérdidas comerciales de agua en los sistemas de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Bogotá”, 2019.
- [97] J. L. Apolo Marchán, “Proyecto de evaluación y reducción de pérdidas en el sistema de abastecimiento de agua”, 2004.
- [98] D. M. Silva, *Gestión participativa en los servicios de saneamiento. la sociedad de agua potable de San Pablo Atlazalpan, Chalco y la asociación pacto ambiental en la gestión de los residuos reciclables en Diadema, Sao Paulo*. El Colegio de México, 2007.
- [99] P. J. S. W. H. P. B. Stålgren, “Corruption in the water sector: Causes, consequences and potential reform”, vol. 4, 2006.
- [100] M. M. González García, “Política pública de abastecimiento de agua potable y condiciones de infraestructura hidráulica en la década de los 90, en Naucalpan”, MM González García, 1998.
- [101] F. J. Salguero Barceló, “La sectorización basada en criterios energéticos como herramienta para la gestión hídrica de redes de distribución de agua”, Universitat Politècnica de València, 2021.
- [102] V. A. Holguin Espinoza, “Análisis del uso de la sectorización para el control de pérdidas del suministro de agua potable en el distrito de Trujillo, 2021”, 2022.
- [103] J. d. J. M. Rodríguez, C. A. C. Coranguez, J. O. Medel, X. V. D. Galván, and P. A. L. Jiménez, “Gestión de la presión para mejora de la eficiencia física en una red experimental de distribución de agua (C. Agua y ciudad, D. Estructuras hidráulicas)”.
- [104] O. A. Abril Orellana, “Sectorización óptima de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Santa Marta, Colombia utilizando los algoritmos METIS”, 2018.
- [105] E. Campbell Gonzalez, “Propuesta para una metodología de sectorización de redes de abastecimiento de agua potable”, 2014.
- [106] L. E. Atoche Ganoza and V. G. Palomino Blas, “Diseño de la red de agua potable y alcantarillado de la HUP Unión del Sur, Nuevo Chimbote, Ancash-2020”, 2021.
- [107] S. M. Limachi Mozo, “Diseño hidráulico del sistema de abastecimiento de agua potable con modelamiento de Watercad y EPANET, Tambillo, Puno, 2021”, 2021.
- [108] P. M. Ticona Talaverano, “Diseño hidráulico del sistema sanitario para asentamientos humanos en el distrito de Comas-Lima, usando los programas WaterCAD y SewerCAD. 2020”, 2022.
- [109] L. D. Vargas Vásquez, “Diseño de redes de agua potable y alcantarillado de la comunidad campesina La Ensenada de Collanac, distrito de Pachacamac, mediante el uso de los programas Watercad y Sewercad”, 2020.
- [110] R. Cobacho, R. Ramírez, D. Torres, and P. J. I. d. a. López-Jiménez, “Implementación de un modelo de predicción de fallos orientado a la gestión y estrategias de mantenimiento en redes de distribución de agua potable”, vol. 23, no. 4, pp. 247-258, 2019.
- [111] S. Fabián and G. Sergio, “Mantenimiento de redes de servicio de agua potable y alcantarillado de Lima-Calao”, 2000.
- [112] A. E. Ilaya-Ayza, W. Sanjinés, C. Martins Alves, E. Campbell, and J. Izquierdo Sebastián, “Estrategia para el mantenimiento preventivo de redes de agua potable en países en vías de desarrollo basada en la capacidad de la red,” in *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería (CMN 2017)*. Actas, 2017, pp. 1691-1696: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIM-NE).
- [113] K. L. Liñan Ruiz, “Análisis comparativo en la utilización de la tubería de PVC y tubería de polietileno en el mantenimiento de redes secundarias de agua potable del Asentamiento Humano Canto Chico-SJL”, 2017.
- [114] L. Frago Sandoval, J. Roberto Ruiz, Z. Flores, and A. B. J. I. h. y. a. Juárez León, “Sistema para control y gestión de redes de agua potable de dos localidades de México”, vol. 34, no. 1, pp. 112-126, 2013.
- [115] Y. Mérida-Martínez, C. A. J. E. Becerril-Tinoco, and comunes, “Crecimiento urbano y gestión del servicio de agua potable en la localidad de Copoya, de Tuxtla Gutiérrez, México”, vol. 2, no. 19, pp. 101-118, 2024.
- [116] Á. F. Morote Seguido, “La planificación y gestión del suministro de agua potable en los municipios urbano-turísticos de Alicante”, 2015.
- [117] J. Rivera-Márquez, M. de Lourdes Hernández-Rodríguez, I. Ocampo-Fletes, A. J. A. y. T. W. María-Ramírez, and Landscape, “Factores condicionantes de la buena gestión del servicio de agua potable en doce comunidades del altiplano mexicano”, no. 9, pp. 105-116, 2017.
- [118] L. Carrión Sánchez, “Aplicación del método de las jerarquías analíticas para la toma de decisiones participativa en la gestión de fugas en redes de abastecimiento de agua”, 2014.
- [119] X. Delgado-Galván, J. Benítez, J. Izquierdo, and R. Pérez-García, “El método de jerarquías analíticas para la inclusión de externalidades en la gestión de pérdidas de agua en redes de abastecimiento”.
- [120] X. Delgado-Galván, M. Herrera, J. Izquierdo, and R. J. U. P. d. V. E. Pérez-García, “Aplicaciones de la metodología AHP para la toma de decisiones en la gestión de la red de abastecimiento”, 2011.
- [121] X. V. Delgado-Galván, J. d. J. M. Rodríguez, J. Benítez,

- R. P. García, and J. J. A. U. Izquierdo, "Toma de decisiones en el manejo de fugas en redes de agua potable", vol. 26, pp. 35-43, 2016.
- [122] B. L. A. Zeledón and H. L. C. J. R. T. Palma, "Análisis de favorabilidad hidrogeológica mediante el Proceso de Jerarquía Analítica y SIG en el Municipio de San Juan de Limay, Estelí, Nicaragua", vol. 3, no. 1, pp. 1-7, 2023.
- [123] L. H. O. Alejo, "Planeación de la reducción de fugas en redes con servicio discontinuo y bajas presiones".
- [124] V. Bourguett Ortiz and L. Ochoa Alejo, "Reducción integral de pérdidas en sistemas de distribución de agua potable", 2003.

## ANEXOS

**Tabla 6.**

Indicadores de métodos de prevención y análisis de fugas en redes de distribución para pérdidas reales

Indicador	Observación	Método de Cálculo	Bibliografía
Indicador operacional de rendimiento	Longitud de conexiones y cantidad de usuarios son evaluados por la densidad del servicio.	Densidad de conexiones por servicio por km.	[16, 33]
Índice lineal de pérdidas	Volumen anual perdido y la longitud de la red, expresado en m <sup>3</sup> /km/h. y calculado mediante pérdidas inevitables	$U_{ARL} = (18L_m + 0.8N_c + 25L_p)^P$ <p>Donde:</p> <p><math>U_{ARL}</math>: Pérdidas reales inevitables (l/conexión/día)</p> <p><math>L_m</math>: Longitud de la red principal (km)</p> <p><math>N_p</math>: Número de conexiones</p> <p><math>L_p</math>: Longitud total de tuberías privadas hasta el medidor (km)</p> <p><math>P</math>: Presión media de la red (m)</p>	[102]

**Tabla 7.**

Relación del catastro de usuarios con los procesos básicos de gestión comercial

Catastro	Medición	Facturación	Cobranza	Comercialización
Registro de usuarios	Toma de lecturas	Procesamiento de lecturas	Recaudación	Atención de solicitudes de servicios y reclamos
Inspecciones domiciliarias	Crítica de lecturas	Procesamiento de facturación	Gestión de cobranza	Atención al mercado
	Instalación y retiro de medidores	Emisión de recibos Distribución de recibos	Cortes y reaperturas Control de servicios cerrados	

Nota. Adaptado de José de Jesús Mora Rodríguez, Christian Alberto Caballero Coranguez, y Josefina Ortiz Medel1, "Gestión de la presión para mejorar la eficiencia física en una red experimental de distribución de agua" [103].

**Tabla 8.** Evaluación de los métodos considerando indicadores de eficiencia en la reducción de pérdidas, en base a casos de estudio

Método	Número de casos de estudio encontrados	Sectorización	Estudios con indicador de pérdidas aparentes	Estudios con Indicador de Pérdidas reales	Análisis	Observaciones respecto al costo detectado	Referencias
Sectorización	13	Cuenta la red primaria y secundaria para el control de caudales	6	1	Se divide (sectoriza) la red de distribución de agua potable de manera geográfica, es un método que no se usa sólo, se combina con cualquier otro.	No tiene referencias relativas al costo por sí solo.	[13, 34, 66-69, 104, 105]
Volumen total	6	Uso de los programas WaterCAD y SewerCAD EPANET	2		Contabiliza el volumen enviado y el volumen facturado con dificultad. Los valores no son reales, solo se tiene estadísticas probables. Se debe combinar con otros métodos. Sólo puede trabajar con indicadores de pérdidas aparentes.	Para asegurar reducción en pérdidas económicas se combina con el método de Reducción de errores de medición.	[70-72, 106-109]
Método de intervención por mantenimiento	23	Uso activo de GIS para control	1	12	Es un método emergente, no de planificación anual que depende de fugas detectadas.	Tiene un costo alto, y en ocasiones se levanta tubería que no requiere ser intervenida.	[2, 73, 110-113]
Gestión de presión	63	Uso de los programas WaterCAD y SewerCAD EPANET, uso de sistemas de información geográfica, y paquetes matemáticos y estadísticos	23	26	Hay dos situaciones en las que la presión puede superar los niveles recomendados. La primera es debido a condiciones topográficas: en redes urbanas con grandes desniveles entre los puntos de consumo, la presión en las zonas más bajas tiende a ser excesiva. En estos casos, es necesario instalar una válvula reductora de presión en las áreas más bajas de la red, con el fin de disipar el exceso de energía y ajustar la presión a un rango adecuado. Es el método más usado, y el que tiene más aceptación entre los autores.	Costos de reparación reducidos en las troncales y fugas.	[67, 70, 74, 114-117]

Método	Número de casos de estudio encontrados	Sectorización	Estudios con indicador de pérdidas aparentes	Estudios con Indicador de Pérdidas reales	Análisis	Observaciones respecto al costo detectado	Referencias
Métodos de jerarquías analíticas	55	Uso de programas varios, y armonización con programas económicos	13	22	Los vectores de priorización y matrices conceptuales son posibles al combinar el método con la gestión de infraestructura y el plan de mantenimiento. Se puede establecer una comparación con el Método de intervención por mantenimiento, mismo que es reparaciones emergentes para ajustar la planificación con la realidad.	Los costos se reducen al ejecutar los planes de mantenimiento producto del análisis multicriterio.	[4, 75-77, 117-122]
Método del gradiente hidráulico	8		2	2	Determinando las presiones en diversos puntos del sistema, así como los caudales, velocidades, pérdidas en las líneas que conforman la red hidráulica, se encuentran casos que sólo toman en cuenta las líneas de presión.	Se combina con el método de control de presiones y los beneficios económicos son los mismos.	[2, 3, 21, 78, 79, 121, 123]
Método de control activo de fugas	48	Gestión activa con varios programas y sistemas de información geográfica	16	12	La localización de fugas tiene un alcance limitado, por lo que el operador debe cooperar con precisión la ubicación de las tuberías. Depende de la relación con usuario en muchos casos y su reporte. Requiere el fortalecimiento de las relaciones.	Se reducen costos al reducir pérdidas, mejorado en la eficiencia de los servicios de distribución y reparando oportunamente el daño.	[21, 33, 80-83, 121, 123]
Balance hídrico nocturno	6	Sólo se verifica que GIS es usado para ubicar caudalímetros	3	1	La colocación de caudalímetros se complica por robos y malas lecturas.	Se reducen costos sólo en sectores donde se puede colocar el equipo.	[15, 84-86]

Método	Número de casos de estudio encontrados	Sectorización	Estudios con indicador de pérdidas aparentes	Estudios con Indicador de Pérdidas reales	Análisis	Observaciones respecto al costo detectado	Referencias
Gestión de infraestructura	44	Gestión activa con varios programas y sistemas de información geográfica	7	7	La gestión de la infraestructura se apoya en la modelización de la frecuencia de roturas, el análisis del envejecimiento de la red y la toma de decisiones sobre la sustitución o renovación de la infraestructura, lo que resulta fundamental para reducir las fugas. Incluso en sistemas de red nuevos, es importante reconocer que, con el tiempo, las infraestructuras sufrirán deterioro, lo que puede provocar pérdidas que varían en magnitud según la gestión implementada.	Los costos se reducen al establecer un programa de revisión de infraestructura que responda a la realidad de cada caso.	[87-90, 120-122]
Velocidad y calidad de las reparaciones	33	Gestión activa con varios programas y sistemas de información geográfica	12	23	Los indicadores de pérdida reales se vuelven fundamentales para medir el tiempo desde que la fuga se conoce hasta su reparación completa.	La detección y reparación temprana de fugas pueden generar ahorros significativos para las empresas de suministro de agua. Ignorar una fuga puede ocasionar daños considerables en la propiedad, y el costo de repararlos podría ser mucho mayor que el de abordar la fuga a tiempo.	[1, 91-93]
Reducción de errores de medición	21	Gestión activa con varios programas y sistemas de información geográfica	8	1	Se usa datos de los caudales de consumo típicos de cada usuario, y se controla los errores de los medidores	Los costos pueden ser elevados en la tecnología de medición del medidor y de la clase metrológica, así como el personal que debe controlar la calibración de medidores.	[57, 94-96, 124]

Método	Número de casos de estudio encontrados	Sectorización	Estudios con indicador de pérdidas aparentes	Estudios con Indicador de Pérdidas reales	Análisis	Observaciones respecto al costo detectado	Referencias
Combate a los fraudes y conexiones clandestinas	46	Gestión activa con varios programas y sistemas de información geográfica	22	3	Se reduce los fraudes en general con la ampliación de la red de agua potable hacia las comunidades más vulnerables, alejadas y marginales. Se inicia y mantiene el proceso de inspección de conexiones clandestinas, con multas severas	Costos asociados se reducen cuando se implementan tarifas sociales en las cuales se reduce el costo del agua potable para familias de bajos ingresos y la implementación de sistemas de detección acústica o satelital	[57, 97-99]



# REVISTA INGENIO

## Evaluación de la Técnica de Algoritmos Genéticos para la Optimización Multi-Objetivo del Dimensionamiento de una Chimenea de Equilibrio Superior Sección Constante y su Ramal de Unión en un Aprovechamiento Hidroeléctrico

### Evaluation of the Genetic Algorithms Technique for the Multi-objective Optimization of the Sizing of a Constant Section Surge Tanks and its Junction Branch in a Hydroelectric Power Plant.

Gabriela del Cisne Bravo Ureña |  Escuela Politécnica Nacional - EPN, Quito, Ecuador

Recibido: 27/7/2024

Recibido tras revisión: 30/9/2024

Aceptado: 5/11/2024

Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Algoritmos genéticos, central hidroeléctrica, método de las características, multiobjetivo, chimenea de equilibrio, ramal de unión.

#### KEY WORDS

Genetic algorithms, hydroelectric power plant, method of characteristics, multi-objective, surge tanks, junction branch.

#### RESUMEN

Este proyecto presenta la aplicación de un algoritmo genético utilizado en el mejoramiento de un sistema hidroeléctrico (sistema de embalse, túnel, chimenea de equilibrio superior, tubería de presión y turbina), utilizando diversas variables hidrodinámicas (flujo transitorio, velocidad de propagación de onda, fenómenos transitorios) y económicas, para alcanzar una optimización de la geometría de la chimenea de equilibrio superior y su ramal de unión. Se desarrolló un programa utilizando el software Matlab por el método de las características para el desarrollo de un modelo numérico unidimensional en una central hidroeléctrica, cuyos resultados fueron las variaciones de la carga piezométrica y caudal al existir un evento transitorio. Aplicando un código para el uso de algoritmos genéticos y utilizando las variables de la función objetivo y parámetros a optimizar, como son el diámetro del ramal de unión y el diámetro de la chimenea de equilibrio, se obtuvieron tres soluciones para el diseño de la chimenea, cada solución se analizó en función de su geometría y costo de construcción. El diseño final cumple con los requisitos técnicos y se integra adecuadamente al entorno. Para comprobar la funcionalidad del programa se realizó el análisis, comparación y comprobación en diez centrales hidroeléctricas, con sus principales parámetros que son el diámetro del ramal de unión, costo de construcción por unidad monetaria y la oscilación, dando como resultados diferentes soluciones, dependiendo de las características iniciales de cada una de las centrales hidráulicas analizadas.

#### ABSTRACT

This project presents the application of a genetic algorithm used in the improvement of a hydroelectric system (reservoir system, tunnel, upper equilibrium chimney, pressure pipe, and turbine), utilizing various hydrodynamic (transient flow, wave propagation speed, transient phenomena) and economic variables, to achieve optimization of the geometry of the upper equilibrium chimney and its connection branch. A program was developed using Matlab software by the method of characteristics to create a one-dimensional numerical model in a hydroelectric power plant, with results showing variations in piezometric head and flow during a transient event. By applying a code for genetic algorithms using the variables of the objective function and parameters to optimize, such as the diameter of the connection branch and the diameter of the equilibrium chimney, three solutions for the chimney design were obtained, each analyzed based on its geometry and construction cost. The final design meets technical requirements and integrates well with the environment. To verify the functionality of the program, an analysis, comparison, and validation were performed on 10 hydroelectric power plants, using their main parameters, including the diameter of the connection branch, construction cost per monetary unit, and oscillation, resulting in different solutions depending on the initial characteristics assigned to each of the analyzed hydraulic plants.

## I. INTRODUCCIÓN (BASE TEÓRICA)

Un **aprovechamiento hidroeléctrico** es un sistema de obras hidrotécnicas, que permiten la generación de energía limpia para el desarrollo de todo tipo de actividades económicas. Dados los altos costos de inversión que representa la conceptualización, diseño, construcción, supervisión y puesta en marcha de este tipo de proyectos, es transcendental desarrollar metodologías que permi-

tan la optimización de la geometría de los componentes de estos sistemas hidroeléctricos [1], involucrando métodos numéricos y técnicas innovadoras de amplia aplicabilidad en ingeniería.

Un esquema típico de un aprovechamiento hidroeléctrico de mediana y gran potencia, describe a un sistema en donde toda la conducción se encuentra totalmente

presurizada, desde el sitio de captación hasta la casa de máquinas. Esta tipología de aprovechamiento, normalmente asocia la presencia de obras subterráneas como túneles, pozos de carga, tuberías enterradas, cavernas, entre otras [2]. Estas estructuras encarecen los proyectos, motivo por el cual deben optimizarse técnica y económicamente, tomando en consideración todos los procedimientos de operación de una central hidroeléctrica.

El **análisis de flujo no permanente** en un aprovechamiento hidroeléctrico, permite estimar la variación de la carga piezométrica y caudal en el dominio espacio (x) - tiempo (t). En función de la variación de estos parámetros hidrodinámicos, se debe buscar las formas y/o dispositivos para atenuar los efectos de este flujo transitorio y prevenir afectaciones a la conducción del sistema; elemento que regularmente suele ser el más costoso de todo el proyecto [3]. Los dispositivos o estructuras que brindan mayores prestaciones para la atenuación del golpe de ariete generado en un aprovechamiento hidroeléctrico son las chimeneas de equilibrio, en donde los efectos del transitorio son sobrellevados mediante una oscilación de masa.

El dimensionamiento de una chimenea de equilibrio superior conlleva al análisis del flujo transitorio en todo el sistema hidroeléctrico, en donde se deben determinar las conducciones con sus propiedades elásticas, el fluido con su módulo de compresibilidad y la variación de caudal en el sistema. Posteriormente, se define la geometría de la chimenea de equilibrio y su ramal de unión, realizando un proceso iterativo en el cual se analizan varios escenarios de operación de la central [4]. Este proceso tiene por objeto optimizar la geometría de la chimenea de equilibrio y su ramal de unión, ajustándose generalmente a un procedimiento manual prueba-error hasta cumplir con las condiciones impuestas por el diseñador.

Todo este proceso debe ser ordenado y compilado en una metodología que permita emplear menores tiempos en el dimensionamiento de una chimenea de equilibrio. Por esta razón se planteará una metodología que involucre la resolución del flujo transitorio en un sistema embalse - túnel - chimenea - tubería de presión - turbinas, mediante el método de las características, para obtener la variación del caudal y carga piezométrica en el tiempo y espacio. Posteriormente se ejecutará una optimización multiobjetivo utilizando la técnica de algoritmos genéticos (AG), en donde se involucren la mayoría de los parámetros hidrodinámicos, de diseño civil y económicos, a fin de obtener una geometría adecuada de una chimenea de equilibrio superior.

La **velocidad de propagación de onda** es la relación entre un espacio recorrido igual a la longitud de onda y el tiempo que se demora en recorrerlo; una onda es la variación de flujo que se puede presentar en un cambio de caudal o en la elevación de la superficie de agua, en cambio la celeridad de onda indica la velocidad con la cual esa variación se mueve a lo largo del canal [5].

Los **fenómenos transitorios** son anomalías ocasionados por la variación de presiones en las conducciones a presión, estos fenómenos pueden ocasionar grandes daños en los sistemas de tuberías encargadas del transporte de agua, es por eso que se los estudia en un régimen transitorio o modelo elástico, con el fin de anticipar matemáticamente los efectos producidos por el golpe de ariete, las sobrepresiones y subpresiones que pueden ocasionar el daño o ruptura de la tubería.

El **aprovechamiento hidroeléctrico** es una serie de instalaciones vitales para transformar la energía potencial de un curso de agua en energía eléctrica, procedimiento que permite aprovechar la energía potencial presente en el agua convirtiendo, primero, en energía cinética, a continuación, en energía mecánica de rotación de la turbina, y finalmente en energía eléctrica.

Se considera como un **embalse** a un depósito de agua que está compuesto por una cuenca alimentadora, un terreno natural donde se almacenará el agua y una estructura de contención que resistirá la presión del agua o presa; antes de crear este embalse es necesario definir cuál será la necesidad que este va a satisfacer, esto será una pauta para conocer el tamaño, ubicación y volumen de agua que se utilizará. Una vez determinados estos parámetros, se estudiará la cuenca y las posibilidades que esta tiene para proporcionar el agua, por lo tanto, un embalse será el resultado de la construcción de una represa en un terreno natural que encerrará el cauce de un río permitiendo almacenar cierto volumen de agua para satisfacer las demandas de una población.

Un **túnel de presión** servirá de paso y conducción para caudales turbinados, reduciendo la longitud de desarrollo de los canales de conducción, mediante una obra de toma y bajo la protección de rejillas, se alimenta al túnel de presión, evitando el ingreso de basura, peces, etc. Esta obra de toma se ubicará por encima del nivel donde se encuentra basura o algo que pueda obstruir el embalse.

Las **chimeneas de equilibrio superior**, también llamadas pozos de oscilación o torres piezométricas, "Son estructuras complementarias a infraestructuras que trabajan con agua y cuyo objetivo es servir de amortiguador a sobrepresiones y subpresiones del canal" [6].

La **tubería de presión** se encarga de transportar el agua desde la captación hasta las turbinas, soportando grandes presiones [7]; el caudal, la altura neta, la velocidad del agua, las pérdidas de carga y presión son las principales características que influyen en el funcionamiento de esta tubería [8].

El objetivo principal de una **turbina** es transformar la energía hidráulica en energía mecánica que, trabajando juntamente con un generador, se convertirá en energía eléctrica, siendo esta una pieza importante dentro de una central hidroeléctrica. El tipo de turbina a utilizar depende directamente de la altura del salto y de la cantidad de agua o caudal que la central proporcione para generar

energía hidráulica, por eso se tiene dos tipos de turbinas: de acción y de reacción [9].

Dentro de este **ramal de unión** con la conducción se explica el concepto de chimenea de orificio, es necesario que el control de la presión máxima que pueda generarse en el orificio no exceda a la carga máxima que se produce debido a la oscilación [3].

El **método de las características** es un procedimiento que sirve para resolver los modelos dinámicos elásticos, se lo utiliza para el análisis de flujo no permanente en las tuberías, ya que a través de esta técnica se puede analizar fácilmente la introducción de diferentes condiciones y consideraciones de borde, es un método muy utilizado en la resolución de modelos dinámicos elásticos.

Cuando se analiza un flujo transitorio, se pretende obtener la solución para conocer completamente las funciones que determinan las presiones y velocidades en cualquier punto de la conducción y en cualquier instante de tiempo.

Es necesario partir de la ecuación de continuidad, en forma diferencial, para realizar el balance diferencial de masa, de esta forma se obtiene la Ecuación de continuidad:

$$\frac{g}{a^2} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{a^2} V \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (1)$$

Luego se analiza el balance diferencial de fuerzas, que se efectúa a partir de la ecuación de la cantidad de movimiento, en forma diferencial, resultando la ecuación:

$$\frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Donde:

$a$  = Celeridad de la onda de presión.

$\frac{\partial H}{\partial t}$  = Altura piezométrica en función del tiempo.

$\frac{\partial v}{\partial x}$  = Velocidad en función del espacio (longitud)

$\frac{\partial Q}{\partial t}$  = Caudal en función del tiempo.

$V$  = Velocidad.

$\theta$  = Grado de inclinación de la tubería.

$\frac{dv}{dt}$  = Velocidad en función del tiempo.

$f$  = Factor de fricción adimensional de Darcy.

$D$  = Diámetro de la tubería.

$\frac{\partial H}{\partial x}$  = Altura piezométrica en función del espacio (longitud).

$A$  = Área de la tubería.

$Q$  = Caudal.

La Ecuación de continuidad (ver Ecuación 1) y la Ecuación de cantidad de movimiento (ver Ecuación 2) se deben colocar en función del caudal con relación a la velo-

cidad, luego, mediante integración numérica, se obtiene el sistema de ecuaciones que representan las características positiva y negativa.

Las condiciones de contorno son las modificaciones de la presión en el sistema en el tiempo y espacio, son representadas por la *Ecuación 1* y la *Ecuación 2*; para resolver es necesario conocer los componentes del sistema hidráulico (depósitos, cambio de diámetro de tuberías, bombas, válvulas) y sus propiedades; otras expresiones más utilizadas son en función de las variables  $H$  y  $Q$ , que modelan el comportamiento de dicho punto, frente a cambios en sus propiedades iniciales.

El **algoritmo genético (AG)** es una técnica de programación que utiliza una evolución biológica para la resolución de problemas [10]. Una vez planteado un algoritmo genético, la entrada de este es un conjunto de soluciones potenciales que se presentarán en ese problema codificados de cierta manera y mediante la función aptitud, permitiendo una evaluación cuantitativa a cada parámetro o candidato, cada candidato son posibles soluciones que funcionarán con el objetivo de mejorar el algoritmo genético.

Estos algoritmos son una familia de procedimientos basados en modelos de cambios genéticos para cierta población de individuos [12], mediante una selección natural se combina la supervivencia de cada secuencia mejor adaptada con cambios aleatorios de información, los organismos genéticos son algoritmos de búsqueda [11].

El funcionamiento de un algoritmo genético se asemeja al proceso de evolución en la naturaleza, y consta de varios componentes clave:

- **Población inicial:** Se crea una población inicial de posibles soluciones al problema que se está tratando de resolver. Estas soluciones se representan de manera genérica.
- **Función de aptitud (fitness):** Se define una función de aptitud que evalúa cuán "buena" es cada solución en la población. Esta función asigna un valor numérico a cada solución basado en su capacidad para resolver el problema. Cuanto mayor sea la aptitud, mejor será la solución.
- **Selección:** Se seleccionan soluciones de la población actual para crear una nueva generación. Las soluciones con una aptitud más alta tienen una mayor probabilidad de ser seleccionadas, pero las soluciones menos aptas también tienen una pequeña probabilidad de ser elegidas, lo que permite una exploración más amplia del espacio de búsqueda.
- **Cruzamiento (crossover):** Las soluciones seleccionadas se combinan entre sí mediante operaciones de cruzamiento, que mezclan partes de las soluciones parentales para crear nuevas soluciones. Esto simula la recombinación genética en la biología.
- **Mutación:** Ocasionalmente, se introduce un pequeño grado de cambio aleatorio en las soluciones resultantes

mediante la mutación. Esto ayuda a introducir diversidad en la población y evita que el algoritmo quede atrapado en óptimos locales.

- **Evaluación de la terminación:** Se evalúa si se ha alcanzado algún criterio de terminación, como un número máximo de generaciones o una solución lo suficientemente buena.

- **Reemplazo:** La nueva generación reemplaza a la generación anterior, y el proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de terminación.

### 1.1. TRABAJOS RELACIONADOS

**Tabla 1.**

Artículos, libros o referencias más utilizados en la investigación

ARTÍCULO	ASPECTOS IMPORTANTES	RESULTADOS OBTENIDOS
Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management. [13].	<p>El objetivo principal es maximizar la eficiencia y la funcionalidad de estos componentes en el contexto de proyectos de energía hidroeléctrica.</p> <p>Los autores proponen un enfoque que se basa en la simulación de computadora y la evaluación de múltiples escenarios para determinar las configuraciones óptimas</p> <p>El proceso de optimización implica la definición de un conjunto de variables de diseño que afectan el rendimiento de los túneles y tanques de sobrepresión. Luego se utiliza un algoritmo genético para explorar y evaluar una variedad de combinaciones posibles de estas variables.</p>	<p>Contribuye al campo de la planificación y gestión de recursos hídricos al ofrecer un enfoque práctico para optimizar la infraestructura clave en proyectos de energía hidroeléctrica.</p> <p>Los resultados de la optimización proporcionan pautas valiosas para mejorar el diseño y la eficiencia de túneles y tanques de sobrepresión, lo que puede tener un impacto significativo en la producción de energía y la gestión de recursos hídricos en general.</p>
Fuzzy genetic algorithm approach for optimization of surge tanks. Scientia Iranica [11].	<p>Se centra en el uso de un enfoque que combina algoritmos genéticos y lógica difusa para la optimización de tanques de sobrepresión en proyectos de ingeniería.</p> <p>La lógica difusa se utiliza para manejar la incertidumbre y la imprecisión en los datos y restricciones del problema de optimización.</p> <p>Los algoritmos genéticos, se emplean para explorar y encontrar soluciones óptimas dentro del espacio de diseño definido.</p> <p>Este enfoque combina la capacidad de los algoritmos genéticos para buscar soluciones globales con la flexibilidad de la lógica difusa para manejar la vaguedad en los criterios de diseño y restricciones.</p>	<p>Esta técnica puede ayudar a mejorar la eficiencia y la funcionalidad de los tanques de sobrepresión en sistemas hidráulicos y, en última instancia, contribuir a una gestión más efectiva de recursos hídricos y sistemas de abastecimiento de agua.</p> <p>Ofrece una forma efectiva de abordar problemas de optimización en sistemas hidráulicos y de gestión de agua, teniendo en cuenta la incertidumbre y la vaguedad en los datos y restricciones del problema.</p>
Aplicación del algoritmo genético multiobjetivo strength pareto evolutionary algorithm (SPEA) y su efectividad en el diseño de redes de agua potable. Caso: Sector Viñanitacna (Tesis pregrado) [4].	<p>El objetivo principal es encontrar soluciones que equilibren múltiples objetivos, como la minimización de costos de construcción, la maximización de la eficiencia del suministro de agua y la minimización de pérdidas de agua.</p>	<p>Los resultados obtenidos muestran cómo SPEA puede generar soluciones que representan compromisos efectivos entre los objetivos múltiples.</p> <p>Se discuten las ventajas y limitaciones del enfoque, así como las implicaciones para el diseño de redes de agua potable en áreas similares.</p>

ARTÍCULO	ASPECTOS IMPORTANTES	RESULTADOS OBTENIDOS
Transient stability of a hydroturbine governing system with different tailrace tunnels. Journal of hydraulic research. [7].	<p>Este estudio se enfoca en analizar la estabilidad transitoria de un sistema de regulación de turbinas hidráulicas y cómo esta estabilidad se ve afectada por las características de los túneles de desagüe asociados.</p> <p>Se examina cómo diferentes diseños y geometrías de túneles de desagüe pueden impactar la respuesta transitoria del sistema de regulación de las turbinas. Esto se hace mediante análisis de simulación y modelado computacional que tienen en cuenta una variedad de condiciones operativas y escenarios transitorios.</p>	<p>Arrojan luz sobre cómo seleccionar y configurar adecuadamente los túneles de desagüe para optimizar la estabilidad y el rendimiento de las turbinas en situaciones transitorias, como cambios en la carga o perturbaciones en el sistema eléctrico.</p> <p>Los hallazgos del estudio tienen implicaciones importantes para la operación eficiente y segura de plantas hidroeléctricas.</p>

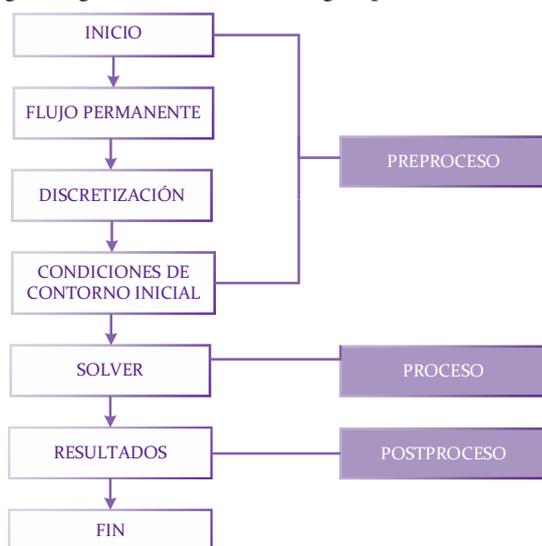
## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. FLUJOGRAMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA APLICADA

Para desarrollar la Ecuación 1 y Ecuación 2 para analizar el método de las características y el algoritmo genético a tratarse en este proyecto, proponiendo realizar una optimización de la chimenea de equilibrio, generando un modelo matemático del flujo transitorio en un sistema propuesto, primero se necesita definir claramente el sistema y las variables involucradas. En la Figura 1 se proporciona una descripción general de cómo se podría abordar el problema de flujo transitorio considerando preproceso, proceso y postproceso.

**Figura 1.**

Flujograma general de la metodología aplicada.



#### 2.1.1. Preproceso

El preproceso se refiere a las tareas o acciones que se realizan antes de ejecutar un proceso principal, es decir, preparar los datos, configuraciones, entornos u otros

elementos necesarios para que el proceso principal sea efectivo y eficiente.

Para este proyecto se ha generado varios scripts como son:

- MET\_CAR: Aplicación que desarrolla el método de las características.
- COURANT: calcular la celeridad para cada una de las tuberías ingresadas.
- ALG\_GEN: Genera resultados en base a algoritmos genéticos.
- RESULTADOS: Genera gráficas y tablas de los resultados del ALG\_GEN.

Las condiciones iniciales consisten en la información sobre datos geométricos e hidráulicos de la conducción y de la chimenea de equilibrio, para ingreso inicial son necesarios los siguientes datos:

Para conductos:

- Longitud de tramo
- Diámetro de tramo
- Coeficiente de rugosidad
- Caudal

Para chimenea de equilibrio:

- Variación Volumétrica
- Diámetro de la chimenea de equilibrio
- Diámetro del ramal de unión
- Coeficientes de pérdidas a la entrada y/o salida de la chimenea

Una vez ingresados todos los datos geométricos, iniciará la simulación y dentro del código empezará la resolución de las condiciones de contorno como las condiciones iniciales del sistema.

Las condiciones de contorno especifican los cálculos a algunas condiciones particulares en los límites o contornos del sistema.

- Condiciones aguas arriba
- Condiciones aguas abajo
- Condiciones puntos intermedios
- Condiciones de la chimenea de equilibrio

El método de las características necesita determinar el paso del tiempo y espacio, garantizando la convergencia del modelo, para poder lograrlo se utiliza la condición de Courant - Friedrichs - Lewy [1].

Una vez analizadas cada una de las tuberías por separado se considera el criterio de Courant - Friedrichs - Lewy y se define un  $\Delta x$ ,  $\Delta t$ , número de tramos, el error permitido será menor al 10% que es una de las condiciones para que sea convergente el modelo.

La carga piezométrica se la determina obteniendo los datos del nivel del embalse ya que este será igual al punto extremo de aguas arriba que es el nivel estático de presión en un reservorio.

### 2.1.2. Proceso

En esta etapa se ejecutan las operaciones específicas. El propósito del proceso es realizar el trabajo principal para el cual se preparó los datos o el entorno durante el preproceso, a continuación, se detalla el procedimiento realizado.

En un flujo transitorio existe una variación de los parámetros hidrodinámicos a través del tiempo generando diferencias en la carga piezométrica en sobrepresiones y depresiones. Para determinar las ecuaciones hidráulicas en un sistema de Embalse - Túnel - Chimenea de Equilibrio Superior - Tubería de presión - Turbina, se debe resolver las ecuaciones diferenciales de masa y fuerza utilizando el método de las características, esta técnica de métodos numéricos es en base al estudio de los transitorios, buscando un modelo que no simplifique las ecuaciones y considere todas las variables, como es el modelo elástico.

Una vez seleccionado el método de las características como modelo de resolución para el sistema propuesto, en la Figura 2 se desarrolló un flujograma que consiste en representación de una serie de procesos en donde se indica el procedimiento de resolución del método de las características.

Para la programación de los algoritmos genéticos se requiere una representación adecuada y una función objetivo que ajuste al problema, que asigne un número real a cada posible solución de codificación. Donde primero se debe seleccionar un padre para la reproducción y luego se realizará el cruce para generar dos hijos, con un operador de mutación diferente.

El resultado de la combinación será un conjunto de individuos (posibles soluciones al problema) que serán parte de la siguiente población. Un individuo debe representarse como un conjunto de parámetros (genes) que cuando se combinan forman una cadena de valores (cromosomas).

La función objetivo juega un papel importante en la clasificación potencial de las soluciones según sus características, es el criterio para optimizar y evaluar las cualidades individuales. Las funciones objetivo que se van a utilizar en este proyecto son:

- Diámetro del Ramal de unión (DOR)
- Diámetro de Chimenea de Equilibrio (DCH)

Una vez definidas las funciones objetivo, estas van a ser los valores que el algoritmo genético va a buscar entre las restricciones dadas por el usuario, de estos diámetros se eliminarán todas las opciones que sobrepasen las condiciones del sistema que se incluirán al modelo como datos iniciales.

Una vez definidos los diámetros el programa desarrollará el método de las características en donde entrega los resultados de carga piezométrica que ocurre en la chimenea de equilibrio, y se compara con los valores del nivel máximo que puede tener la chimenea.

Una vez elegida la solución que cumpla con todas las condiciones del proyecto, el programa realiza un listado de las soluciones más sobresalientes obtenidas de los datos iniciales de población e iteraciones ingresadas por el usuario, cada uno de estos resultados tendrá adicionalmente un valor proporcional de lo que costaría realizar este tipo de chimenea de equilibrio en unidad monetaria, además va a servir como referente para realizar un análisis no solo con carga piezométrica, sino un costo para ejecutar el proyecto, su importancia radica en que se cuenta con dos parámetros para dar una solución óptima y precisa para resolver este problema.

Se necesita definir el costo de la chimenea de equilibrio por lo que se realizó un análisis para definir los rubros más representativos en la construcción y los que tienen un valor en unidad monetaria que elevan los costos en una chimenea de equilibrio.

### 2.1.3. Postproceso

En el postproceso se analizará los resultados del proceso principal, realizando tareas de limpieza posteriores a tomar medidas basadas en los resultados.

Para realizar el análisis de las soluciones del algoritmo genético se creó un script llamado GRÁFICAS. Una vez realizado el algoritmo genético el programa solicita al usuario cargar los resultados obtenidos en el optimizador, donde la primera tabla que se muestra tiene el diámetro de la chimenea de equilibrio y su diámetro de ramal de unión con el valor de la carga piezométrica.

Se puede definir que los algoritmos genéticos usados como alternativa para solucionar problemas de dimensionamiento de la chimenea de equilibrio y del ramal de unión, son una herramienta muy eficaz debido a que son capaces de presentar diversas opciones en lo que respecta a la solución de problemas que afectan a la comunidad.

Para comprobar los resultados y determinar las relaciones que pueden existir se realizaron cinco gráficas que relacionan los siguientes parámetros:

- El diámetro del orificio restringido
- El costo de la chimenea
- Pérdidas de carga
- Diferencia de diámetros
- Diámetro del orificio restringido mínimo
- Costo de la chimenea mínimo
- Diámetro del orificio restringido mínimo
- Costo de la chimenea mínimo

Con los mejores resultados obtenidos por el algoritmo se realizó una gráfica de dispersión y al aplicar la línea de tendencia polinómica genera una relación inversamente proporcional entre estos resultados obtenidos.

La relación inversamente proporcional entre dos variables en este caso el diámetro del ramal de unión y el costo de construcción de la chimenea de equilibrio significa que cuando una variable aumenta, la otra disminuye, y viceversa, en proporciones tales que su producto se mantiene constante.

## 2.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO

Para demostrar la aplicabilidad del programa se buscaron datos en la página de Celec y se efectuó la revisión del estudio de Factibilidad Avanzada, efectuada por ASTEC, luego se realizaron actualizaciones de los estudios tendientes a mejorar las características del proyecto hidroeléctri-

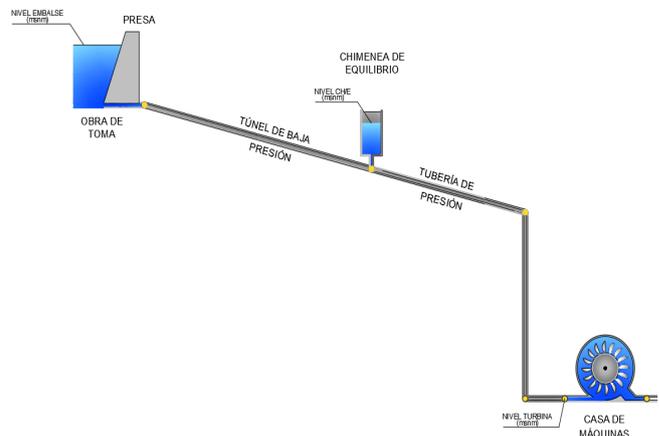
co, para definir los valores iniciales de diez centrales hidroeléctricas que se van a analizar en este proyecto.

Las centrales hidroeléctricas seleccionadas presentan una diversidad de características hidráulicas que las hacen especialmente interesantes para este estudio. Su análisis permitirá comprender mejor el comportamiento de diferentes turbinas y sistemas de generación. Además, la variedad en sus características geográficas y de diseño ofrecerá información valiosa sobre la eficiencia y optimización que se está realizando en el estudio.

A continuación, se presenta en la Tabla 2 el resumen de los principales datos de las centrales como el nivel máximo del embalse (NE), la cota superior del pozo de la chimenea de equilibrio (HCH/E), la cota del eje de la turbina (NT), el tipo de turbina y el caudal de diseño (Q) de las centrales hidroeléctricas analizadas en este proyecto.

**Figura 2.**

Esquema Obra de toma - *túnel de baja presión* - chimenea de equilibrio - tubería de presión y casa de máquinas



**Tabla 2.**

Datos de las centrales hidroeléctricas.

HIDROELÉCTRICA	NE (msnm)	HCH/E (msnm)	NT (man)	TIPO TURBINA	Q (m <sup>3</sup> /s)
1 CHONTAL	780.00	795.00	643.20	FRANCIS	180
2 MINAS SAN FRANCISCO	795.00	811.00	281.32	PELTON	65
3 LA UNIÓN	273.96	302.00	85.80	FRANCIS	65
4 OCAÑA II	451.90	480.69	275.00	PELTON	20
5 TOACHI PILATÓN	970.00	1013.00	732.00	FRANCIS	100
6 QUIJOS	2041.85	2060.00	1803.08	FRANCIS	22
7 LLANGANATES	2507.40	2499.93	2331.60	FRANCIS	13
8 APAQUI	2300.00	2315.00	1704.85	FRANCIS	9
9 SOPLADORA	1316.87	1333.00	978.00	FRANCIS	150
10 PALMA REAL	1148.00	1145.00	896.00	FRANCIS	80

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. COMPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO ORIGINAL Y EL DISEÑO OPTIMIZADO

Se realizó el proceso de optimización consiguiendo un tiempo de 15 min, con un promedio 1.5 min por iteración, este tiempo depende del tamaño de la población inicial y el número de iteraciones ingresadas, además de las características y capacidad tecnológica del computador utilizado para realizar la corrida.

Dentro de los resultados que se van a mostrar se encuentran los datos de diseño inicial que se abreviarán como DI, solución 1 como S1, solución 2 con S2 y solución 3 con S3 para cada una de las centrales hidroeléctricas, la diferencia entre sí es la modificación del diámetro del orificio restringido que va a ser considerablemente más pequeño con respecto al diámetro de la chimenea de equilibrio.

Una vez que finaliza este proceso de optimización, el programa ALG\_GEN genera un archivo llamado result.xlsx en donde se encuentran los siguientes datos:

- Diámetro de chimenea de equilibrio (DCH)
- Diámetro del orificio restringido o ramal de unión (DOR)
- Carga piezométrica
- Costos

Una vez filtrados los resultados con los que se va a trabajar se seleccionan tres soluciones basándose en los siguientes parámetros:

- Solución 1 (S1): máximos costos de construcción de chimenea de equilibrio, máxima oscilación. (Mayores costos, mayor oscilación en chimenea de equilibrio).
- Solución 2 (S2): costos de construcción de chimenea de equilibrio intermedios, se escogerá oscilaciones promedio. (Iguales costos igual oscilación en chimenea de equilibrio).
- Solución 3 (S3): mínimos costos de construcción de chimenea de equilibrio y mínima oscilación. (Menor costo, menor oscilación en chimenea de equilibrio).

En la Figura 3 y Figura 4 se puede observar los valores de los diámetros de chimenea de equilibrio (DCH) vs. las centrales hidroeléctricas y los valores de los diámetros de orificio restringido (DOR) vs. las centrales hidroeléctricas, respectivamente, en los cuales se representa las medias de las tres mejores soluciones seleccionadas por el programa, donde se ve claramente la diferencia entre los diámetros con respecto al original.

Figura 3.

Relación de diámetros de chimenea de equilibrio (DCH) vs. las centrales hidroeléctricas

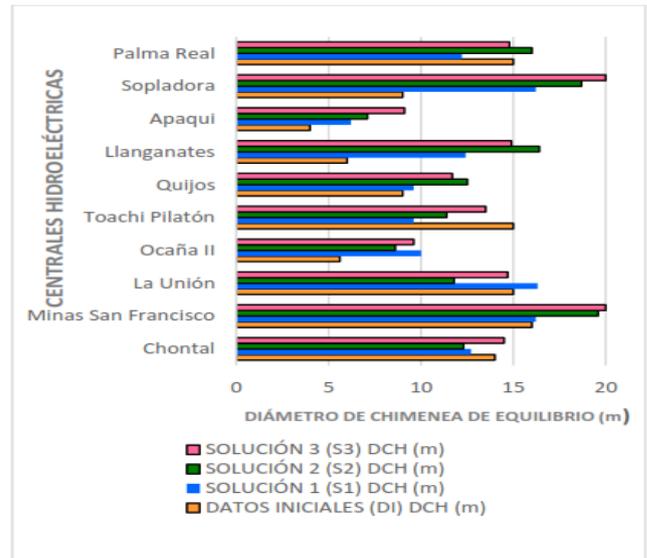
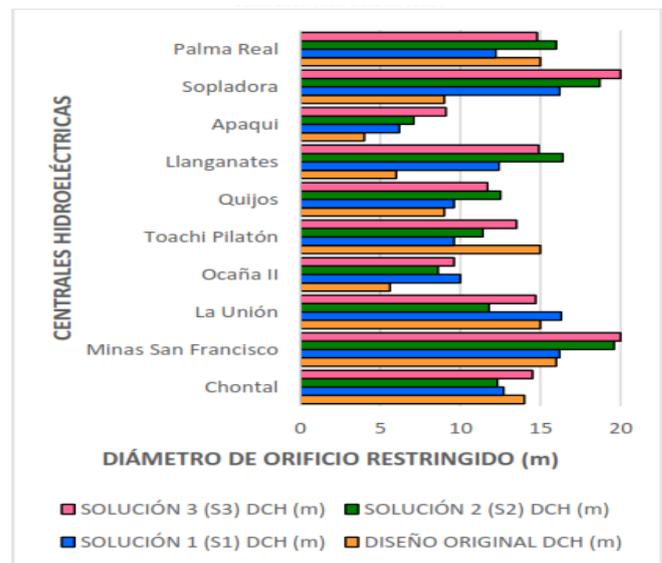


Figura 4.

Relación de diámetros de chimenea de equilibrio (DOR) vs. las centrales hidroeléctricas.



#### 3.2. VERIFICACIÓN DE LAS ENVOLVENTES EXTREMAS DE CARGA PIEZOMÉTRICA

Para la resolución de transitorios en el sistema embalse - túnel - chimenea de equilibrio superior - tubería de presión - turbina, se requiere de programas de cálculo numérico que permitan la solución simultánea de las ecuaciones de continuidad y dinámica para un flujo variado y no permanente. Se utiliza el método de las características que permite determinar las cargas y caudal a lo largo de la tubería en cualquier instante de tiempo.

Es más importante establecer los valores máximos y mínimos de la carga que se presentará en cada punto de la conducción, independientemente del tiempo en el que se haya presentado, para cada una de las centrales hidroeléctricas que se va a analizar. Las envolventes de cargas extremas están conformadas por envolventes de cargas máximas y envolventes de cargas mínimas que dará el programa.

Una vez ingresados los datos de DOR y DCH de cada central hidroeléctrica se generan resultados para desarrollar gráficas de envolventes extremas de carga piezométrica, donde con sus valores de envolventes máximas y mínimas, se podrá definir los transitorios que existen alrededor de la conducción.

Cada una de las centrales hidroeléctricas tendrá cuatro gráficas para envolventes máximas - mínimas y los valores iniciales, identificando que la relación con respecto a las envolventes es muy similar, difieren muy poco con relación a la carga piezométrica, esto indica que las soluciones escogidas con el programa ayudan al momento de tomar una decisión con respecto a seleccionar la mejor solución.

Al analizar las envolventes de cargas mínimas se puede indicar que si uno de los valores obtenidos pasa por debajo del perfil de la tubería se obtendrá presiones negativas encontrándose depresión en la conducción, para el caso de las hidroeléctricas analizadas se puede observar que ninguna solución da presiones negativas, por lo no existen problema de depresión ni sobrepresión en la conducción.

Un resultado de los gráficos obtenidos presentados de las envolventes de cargas extremas va a indicar el análisis de los transitorios hidráulicos en las tuberías a presión; además, se puede observar que por sus diámetros de chimenea de equilibrio, relativamente similares, se tiene variaciones mínimas de la carga piezométrica, debido a la disminución del diámetro, la carga piezométrica máxima tiene un decremento en comparación con los otros resultados y la carga piezométrica mínima tiene un incremento.

### 3.3. OSCILACIONES DE MASA EN CHIMENEA DE EQUILIBRIO SUPERIOR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el método de las características de la variación de la altura piezométrica de las tuberías en el tiempo y el efecto que ocasiona el cambio de diámetro en la chimenea de equilibrio o en el orificio restringido al aumento de las pérdidas de carga.

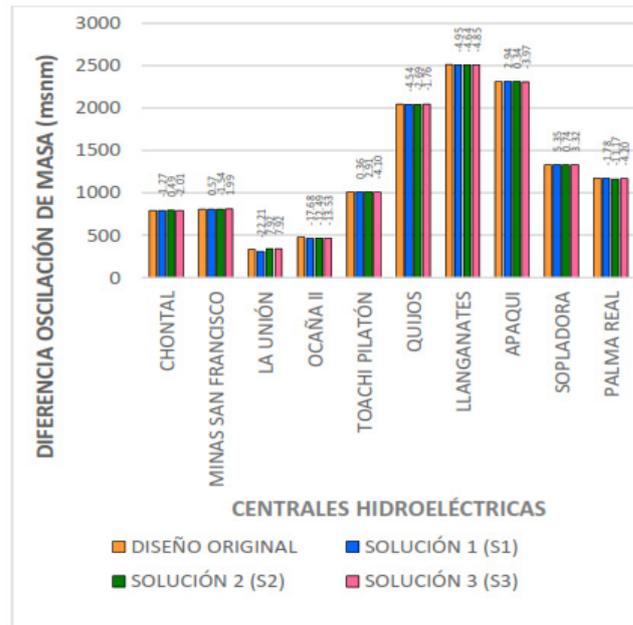
Para cada una de las centrales hidroeléctricas, la diferencia entre sí es la modificación del diámetro del orificio restringido que va a ser considerablemente más pequeño con respecto al diámetro de la chimenea de equilibrio, lo que va a generar un aumento de las pérdidas de carga, ocasionando una mejor estabilidad y amortiguación de las oscilaciones de masa.

Como resultado, se obtiene que las oscilaciones de masa ocurridas en la chimenea de equilibrio, varían considerablemente dependiendo del área y del tipo de cierre de válvula, a mayor área las oscilaciones presentes son menores.

Se puede apreciar que, dependiendo de cada una de las soluciones, las oscilaciones varían de manera considerable al cambiar el área de la chimenea instalada para un mismo tipo de cierre. Teniendo en cuenta que para mayor área el movimiento presenta una amplitud menor y también un periodo mayor.

Figura 5.

Diferencia de oscilación de masa vs. centrales hidroeléctricas.



### 3.4. RELACIÓN ENTRE LA MÁXIMA SOBREPRESIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL RAMAL DE UNIÓN

Al tener una chimenea de equilibrio con un orificio restringido esta produce pérdidas de carga que son mayores cuando el agua entra en el tanque que cuando sale, es por esta razón que es necesario determinar las pérdidas que existen en comparación con una chimenea de equilibrio simple.

La carga piezométrica máxima que existe en una chimenea de equilibrio con y sin orificio restringido, determina las pérdidas de carga que existen, tanto en el diseño inicial como en cada una de las soluciones, concurriendo una mayor pérdida de carga al existir ramal de unión, reduciendo de esta forma los resultados de oscilación de las chimeneas simples.

Esta diferencia que existe entre las dos cargas piezométricas es el valor de pérdida de carga que se tiene al utilizar el ramal de unión en una chimenea de equilibrio, es por esta razón que se puede disminuir diámetros si se hace una correcta elección en las dimensiones, sabiendo que mientras más grande sea el ramal de unión, menores serán las pérdidas, con los resultados se observa que un

diámetro de orificio restringido pequeño genera valores más altos de pérdidas de carga.

Con estos resultados evidentemente, una chimenea simple tendrá un costo de construcción alto, debido a que es necesario realizar gastos en excavación y recubrimiento de la sección transversal que ocupará esta chimenea para evitar el desgaste de material cuando exista contacto con el agua, tomando en cuenta que la altura debe ser mayor, para suplir con las necesidades que tiene el sistema de equilibrar las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete. Razón por la cual, la mejor solución con respecto a reducir las sobrepresiones va a ser el ramal de unión, el cual permitirá que exista una pérdida de carga que atenúe las oscilaciones del nivel de agua que ocurren al existir operaciones bruscas, siendo estas de apertura o cierre. La chimenea de equilibrio cumple con la función de permitir un movimiento oscilatorio con el embalse, como efecto del golpe de ariete que pueda darse en el sistema a causa de una maniobra brusca en la operación de las válvulas de guardia.

### 3.5. ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL Y EL SISTEMA OPTIMIZADO.

Como resultado de los algoritmos genéticos se encuentran los mejores resultados con base en el costo de la chimenea de equilibrio vs. la oscilación, en la cual se determina que no por ser el costo más alto la oscilación es menor, esto dependerá del área del orificio restringido que se tenga para esta chimenea.

Se puede definir que los algoritmos genéticos usados como alternativa para solucionar problemas de dimensionamiento de la chimenea de equilibrio y del ramal de unión, son una herramienta muy eficaz debido a que son capaces de presentar diversas opciones en lo que respecta a la solución de problemas que afectan a la comunidad.

En la Figura 7 se representa los resultados de la diferencia de los costos de construcción de cada solución de las chimeneas de equilibrio con respecto al valor original, en las cuales la variación de los resultados indica cuál de las soluciones se puede escoger para utilizar en el diseño, debido a que el valor del costo de construcción está relacionado con la oscilación, el menor costo también representa una disminución de la oscilación.

## 4. CONCLUSIONES

### 4.1. CONCLUSIONES DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO ORIGINAL Y EL DISEÑO OPTIMIZADO

- Con el valor promedio de los diámetros de la chimenea de equilibrio de las tres soluciones en comparación

con el diámetro inicial para cada una de las centrales hidroeléctricas se puede determinar que:

- Chontal tiene una disminución del 6%
- Minas San Francisco un incremento del 16%
- La Unión una disminución del 5%
- Ocaña II un incremento del 68%
- Toachi Pilatón una disminución del 23%
- Quijos un incremento de 25%
- Llanganates un incremento de 25%
- Apaquí un incremento de 143%
- Sopladora un incremento de 87%
- Palma Real una disminución de 4%

Teniendo un valor promedio para todos los diámetros de chimenea de equilibrio el 40% incrementó, estableciendo que para el caso de las chimeneas de equilibrio el aumento de la sección es la solución más recomendable.

- Para el caso de los diámetros de orificio restringido, relacionando un promedio de las tres soluciones y comparando con el diámetro inicial se puede determinar que para cada una de las centrales se tiene los siguientes valores:

- Chontal se tiene una disminución del 11%
- Minas San Francisco una disminución del 28%
- La Unión una disminución del 38%
- Ocaña II una disminución del 26%
- Toachi Pilatón una disminución del 19%
- Quijos una disminución de 12%
- Llanganates una disminución 35%
- Apaquí un incremento de 161%
- Sopladora una disminución de 7%
- Palma Real una disminución de 28%

Se tiene un valor promedio para todos los diámetros de orificio restringido del 4% de disminución, estableciendo que para el caso del orificio restringido las soluciones más óptimas están relacionadas con la disminución del diámetro.

### 4.2. CONCLUSIONES DE LAS ENVOLVENTES EXTREMAS DE CARGA PIEZOMÉTRICA.

- Haciendo una comparación entre los datos generados para el diseño y las tres soluciones, se puede observar que estos datos varían en el 4%, ya sea de incremento o disminución de la oscilación, siendo la más crítica la oscilación de la central hidroeléctrica La Unión.
- Las centrales hidroeléctricas con una disminución de la oscilación y con un porcentaje menor al 1% son las centrales hidroeléctricas Ocaña II, Apaquí y Palma Real, siendo este el 30% del total del análisis.

- Para el total de centrales hidroeléctricas analizadas se tiene un incremento del nivel máximo de la oscilación en la chimenea de equilibrio del 0.19% siendo este un valor mínimo, determinando de esta forma la eficiencia de la selección de los diámetros a analizarse.

#### 4.3. CONCLUSIONES DE LAS OSCILACIONES DE MASA EN CHIMENEA DE EQUILIBRIO SUPERIOR

- Los resultados del nivel máximo de oscilación en la chimenea de equilibrio comparando las soluciones y el dato inicial indica que existe una disminución del nivel en un 0.45% de la carga piezométrica del 80% del total de las centrales hidroeléctricas.
- Al realizar el análisis del tiempo del nivel máximo de oscilación se puede determinar que existe un incremento en un 22.69%, teniendo un valor más elevado en la central hidroeléctrica Ocaña II con un 98% mayor al original, esto en vista de que los diámetros de la chimenea de equilibrio de las soluciones son más grandes y el diámetro del orificio restringido disminuye.
- Con los datos de oscilación de masa de la central hidroeléctrica Llanganates se puede determinar que los diámetros de las tres soluciones son muy grandes en comparación con el diámetro inicial, generando unas oscilaciones más prolongadas en el tiempo y con un menor valor que la original, teniendo valores de diámetro de la chimenea de equilibrio mayores al 143% superior del diámetro original.

#### 4.4. CONCLUSIONES DE LA RELACIÓN ENTRE LA MÁXIMA SOBREPRESIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL RAMAL DE UNIÓN

- Con los datos de pérdidas de carga se puede determinar que para la central hidroeléctrica Toachi Pilatón, con la solución 1 se incrementa de una manera muy drástica el nivel máximo de oscilación en la chimenea, es por esta razón que sus pérdidas de carga son excesivas en comparación con las otras dos soluciones y del valor inicial, teniendo un incremento excesivo.
- Con estos resultados, evidentemente el incremento del nivel de oscilación, al no existir un orificio restringido, ocasiona que existan datos muy altos, que generan pérdidas de carga elevadas, como son el caso de las centrales hidroeléctricas de Ocaña II, Toachi Pilatón, Sopladora y Palma Real, generando un incremento de más del 100% en comparación con el diseño original.

#### 4.5. CONCLUSIONES DE LA ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL Y EL SISTEMA OPTIMIZADO

- Para la central hidroeléctrica Chontal se obtiene que los valores iniciales de la chimenea original necesitan de \$ 1.19 UM para tener una oscilación de 792.49 msnm; en la solución 1 requiere de \$ 1.01 UM para una oscilación 791.22 msnm; la solución 2 con \$ 1.47 UM para una oscilación 792.40 msnm. Finalmente, en la tercera solución es necesario de \$ 1.89 UM para una oscilación 792.44 msnm; esto demuestra que la solución más óptima es la solución 1 ya que disminuye un 15% el costo total de fabricación de la chimenea, además se disminuye un 0.16% la oscilación, esto quiere decir que la altura de la chimenea será menor a la propuesta en el sistema original.
- Las diez centrales hidroeléctricas analizadas permiten realizar una gráfica más real con respecto a su diámetro del orificio restringido vs. el costo de la chimenea de equilibrio, escogiendo un valor del diámetro del orificio restringido, ir a la línea de tendencia y generar un costo en unidades monetarias más representativo al tipo de hidroeléctrica que se está trabajando; para el caso de las gráficas de pérdidas de carga y la diferencia de los diámetros de orificio restringido y chimenea de equilibrio su línea de tendencia polinómica de segundo grado no representa una solución que se pueda representar en este estudio debido a que sus valores son muy dispersos.

#### 4.6. CONCLUSIONES GENERALES

- La resolución de una chimenea de equilibrio con el método de características puede tomar mucho tiempo en su aplicación al intentar encontrar la mejor solución entre una población mayor, razón por la cual al utilizar algoritmos genéticos se pudo comprobar que disminuyó los tiempos de obtención de resultados y generar soluciones factibles que el usuario estaría dispuesto a elegir.
- Mediante este programa, se logró crear aplicaciones para que al utilizar algoritmos genéticos sirvan como instrumento para resolver los problemas que presenta una central hidroeléctrica, constituyéndose como una herramienta eficaz al momento de tomar decisiones, debido a que la técnica de optimización genera soluciones simultáneas a diferentes problemas como la determinación de diámetro de chimenea de equilibrio y diámetro de ramal de unión, asimismo cumple con un valor de costo, utilizando los múltiples criterios.
- La forma más certera para comprobar los resultados de la optimización es realizar un *benchmark*. Esta técnica consiste en medir el rendimiento de la aplicación, utilizando varias máquinas para determinar el tiempo de ejecución más eficiente, de la cual en procesador Intel

Core I7 se tuvo un tiempo de ejecución de 15 min, siendo un tiempo muy corto en comparación con el tiempo que toma realizar el mismo procedimiento de forma manual ingresando diferentes condiciones para probar al sistema.

- Con los resultados de las hidroeléctricas se llegó a la conclusión de que cada una de ellas tiene su propia relación, sin embargo, al agruparlos para representar una gráfica total no se puede generalizar los resultados, observando que no existe ninguna relación entre ellas.

**REFERENCIAS**

[1] Calderón Vásquez, D. N. & Enríquez Paredes, D. F. (2011). *Diseño y optimización de una hoja de cálculo para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.

[2] Capdevila, J. F., Ruiz, J. M., Salinas, J. L., & Sánchez Pérez, E. (2010). Redes neuronales y algoritmos genéticos en la docencia en las escuelas de ingenieros: un problema práctico de diseño de pantallas acústicas. *Modelling in Science Education and Learning*, 3(2), 17-27.

[3] Silva Padilla, P. G. & Veliz Sánchez, E. D. (2012). *Análisis del flujo no permanente en chimeneas de equilibrio por medio de una simulación numérica* (Tesis pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito.

[4] Quevedo Porras, V. Z. (2017). *Aplicación del algoritmo genético multiobjetivo strength pareto evolutionary algorithm y su efectividad en el diseño de redes de agua potable. Caso: Sector Viñanitacna* (Tesis pregrado). Universidad Privada de Tacna, Tacna.

[5] Universidad Nacional de Ingeniería, D. (2015). Tránsito hidráulico, flujo en superficies libres.

[6] Marcos Fano, J. (2018). La generación de energía hidroeléctrica. España: UNESA.

[7] Chen, D., Li, C., Pang, W., Patelli, E., Tian, Y., Zhang, H., & Zhou, J. (2019). Transient stability of a hydro-turbine governing system with different tailrace tunnels. *Journal of Hydraulic Research*, 1-10.

[8] Sandoval Erazo, W. (2018). *Diseño de obras hidrotécnicas*. Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.

[9] Tituaña Vázquez, G. & Torres Rivas, E. (2018). *Diseño de tubería de presión en centrales hidroeléctricas y análisis comparativo de tecnología de materiales acero y poliéster reforzado con fibra de vidrio*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

[10] Guervós, M. (2004). Informática evolutiva: algoritmos genéticos.

[11] Chamani, M. R., Pourshahabi, S., & Sheikholesalm, F. (2013). Fuzzy genetic algorithm approach for optimization of surge tanks. *Scientia Iranica*, 20(2), 278-285.

[12] Molina Godoy, N. (2019). *Estudio de fenómenos transitorios en aducciones de centrales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

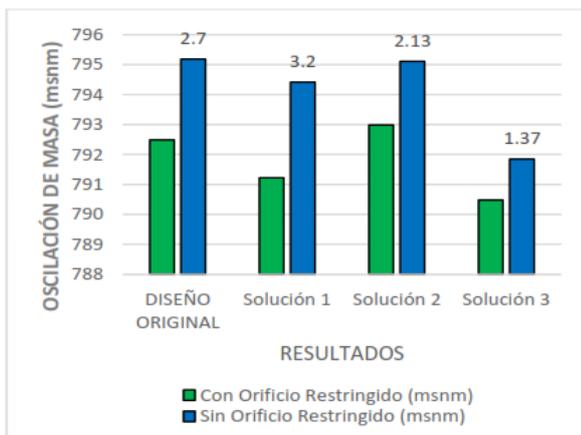
[13] Fathi-Moghadam, M., Haghhighipour, S. y Vali Samani, H. M. (2013). Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 200-208.

[14] Molina Godoy, N. (2019). *Estudio de fenómenos transitorios en aducciones de centrales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

**ANEXOS**

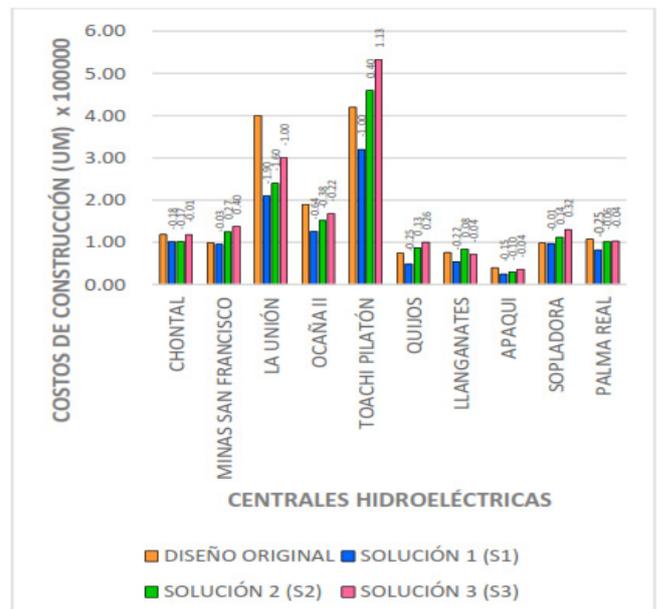
**Figura 6.**

Relación oscilación de masa vs soluciones y diseño original.



**Figura 7.**

Relación costo de construcción vs centrales hidroeléctricas.





# REVISTA INGENIO

## Sistemas SCADA, Aplicaciones en Plantas Potabilizadoras de Agua de la Costa Ecuatoriana, Caso Municipio del Cantón El Empalme

### SCADA Systems, Applications in Water Treatment Plants along the Ecuadorian Coast Region, Case study: El Empalme Municipality

Carlos David Amaya Jaramillo |  Universidad Estatal de Quevedo - UTEQ, Quevedo - Ecuador  
Geovanny Gonzalo Guerrero Muñoz |  Universidad Estatal de Quevedo - UTEQ, Quevedo - Ecuador  
Cristian Samuel Laverde Albarracín |  Universidad Estatal de Quevedo - UTEQ, Quevedo - Ecuador  
Rogger José Andrade Cedeño |  Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manul Feliz López, Manabí - Ecuador

Recibido: 8/4/2024  
Recibido tras revisión: 1/5/2024  
Aceptado: 3/7/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Monitoreo en tiempo real, control y adquisición de datos, automatización, comunicación industrial.

#### KEY WORDS

Real-time monitoring, data acquisition and control, automation, industrial communication.

#### RESUMEN

Este trabajo describe el diseño de un sistema SCADA para mejorar el servicio de agua potable en el municipio del Cantón El Empalme, Ecuador. Se detallan las fases del diseño, los criterios para el análisis del estado de automatización de la planta, el diseño de la automatización y la selección de dispositivos. El sistema SCADA, que utiliza PLCs, sensores y bombas conectados a través del protocolo ModBus TCP, mejoró la eficiencia operativa, redujo los tiempos de respuesta y contribuyó a la calidad del producto final. Se identificaron problemas como desequilibrio en las protecciones de los tableros y tiempos de respuesta prolongados, los cuales fueron abordados mediante la simulación del modelo de automatización.

#### ABSTRACT

This work describes the design of a SCADA system to improve the drinking water service in the municipality of El Empalme Canton, Ecuador. It outlines the design phases, criteria for analyzing the automation status of the plant, automation design, and device selection. The SCADA system, which uses PLCs, sensors, and pumps connected via the ModBus TCP protocol, enhanced operational efficiency, reduced response times, and contributed to the quality of the final product. Issues such as imbalances in panel protections and extended response times were addressed through simulation of the automation model.

## I. INTRODUCCIÓN

Para el diseño del sistema SCADA en El Empalme, Ecuador, se considerarán los componentes esenciales de una red SCADA, que incluyen sistemas de adquisición de datos, sistemas de transmisión de datos y software de interfaz hombre-máquina (HMI). Estos componentes se integrarán para proporcionar un sistema centralizado de monitoreo y control, permitiendo la supervisión y control en tiempo real de toda la red desde una ubicación remota [1].

El hardware comúnmente utilizado en las redes SCADA incluye la Unidad de Estación Maestra (MSU) o Unidad de Terminal Maestra (MTU), sub-MSUs, sitios de campo distribuidos geográficamente que consisten

en Unidades Terminales Remotas (RTUs) y Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs), así como enlaces y equipos de comunicación. La MSU o MTU almacenará y procesará la información de entradas y salidas de las unidades de estación esclava, RTUs o IEDs, mientras que las unidades de estación esclava controlarán el proceso local [1].

El diseño del SCADA, permite entregar, a la planta de tratamiento de agua del Gobierno Autónomo Municipal de El Empalme (GADMEE), una alternativa para la automatización de sus controles eléctricos, medición en tiempo real de los niveles de agua en los tanques de distribución y control de la producción final de la misma; al

diseñar este sistema, es posible que se evite el mal funcionamiento de las bombas, gracias a que una de las principales características de este sistema, es el monitoreo en tiempo real en la operación.

En la actualidad, la implementación de sistemas SCADA en plantas potabilizadoras de agua se ha convertido en una herramienta esencial para optimizar la gestión y distribución del recurso hídrico. Diversos estudios han demostrado que estos sistemas permiten el monitoreo en tiempo real de los sistemas de suministro de agua, optimizando la pérdida de agua y mejorando su calidad. Además, la seguridad de las redes SCADA es crucial para la protección de infraestructuras críticas, y se han desarrollado esquemas de gestión de claves para asegurar las comunicaciones [1]. La vulnerabilidad de estos sistemas y la necesidad de políticas de seguridad de la información y análisis de riesgos también han sido ampliamente documentadas [2]. La integración de tecnologías IoT con SCADA ha permitido avances significativos en el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real, reduciendo costos y aumentando la eficiencia [3]. Este trabajo se enfoca en el diseño de un sistema SCADA para mejorar el servicio de agua potable en el municipio del cantón El Empalme, Ecuador, aprovechando las mejores prácticas y tecnologías disponibles.

## 2. MÉTODO

El procedimiento a seguir para efectuar el diseño del SCADA se lo ha dividido en tres fases, en la primera se toma en cuenta el estudio del estado de la planta, en la segunda las necesidades técnicas de la planta en conjunto con el diseño de la automatización, por último, en la tercera fase se define la selección de los dispositivos disponibles en el mercado.

### 2.1. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE AUTOMATIZACIÓN DE LA PLANTA

El proceso que se realizó en esta fase consta de:

- Inspección visual de los controles eléctricos y equipos instalados. Por medio de la observación directa se determinan cuáles son los dispositivos instalados en la etapa de admisión y distribución de la planta de potabilización de agua del GADMEE, los cuales son:
  - Etapa de admisión: Esta etapa cuenta con un sistema de arranque estrella-delta y protecciones de pérdida de fase para bombas de 55 kW o 70 HP
    - 4 Motor WEG W22 IE1 55 kW
    - Arranque por estrella triángulo
    - 4 P/N ICM450.
  - Etapa de distribución: Se tienen instaladas 3 bombas, controladas por dos arrancadores suaves y un

variador de frecuencias, en esta etapa se presentan dos reservorios de 2.000 m<sup>3</sup>

- 1 Motor gt1043a Marathon 55 kW
- 2 motores Siemens 55 kW
- 1 arrancador suave Sirius 3RW40
- 1 arrancador suave Altistar 48
- 1 variador de velocidad Altivar 61
- Etapa de floculación:
  - 1 bomba de agua jet750G1
  - 1 bomba de agua Pedrollo CPM650 de 1.5 HP
  - 1 bomba de agua Shimge JET750G1
  - 1 bomba dosificadora BlackLine Pro
  - 1 bomba de agua Leo Acro150
  - 1 bomba de agua Pedrollo JSWM 3BM
- Revisión de los tiempos de respuesta de los operadores de la planta. Se debe medir cuánto tiempo tardan los operadores de la planta en encender y apagar las bombas de la planta, para lo cual se toman escenarios en donde el operador se moviliza a pie, motocicleta y automóvil.

### 2.2. CRITERIOS PARA REALIZAR EL DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN

El diseño de la automatización tiene requerimientos de software y hardware los cuales se detallan a continuación:

- Requerimientos técnicos de la planta de potabilización. Se requiere automatizar y monitorear las bombas de admisión y distribución; medición de los niveles en los tanques de distribución y del caudal de salida.
- Red de comunicación industrial. Donde se integren los componentes, comunicación y compatibilidad entre ellos (Cockerham, 2021), (TechTarget, 2021).
- Interfaz de usuario. Mostrando organización de la información y de los elementos de la interfaz, navegación y estructura clara y consistente (TechTarget, 2021).
- Escalabilidad. Un sistema modular con capacidad de expansión futura.

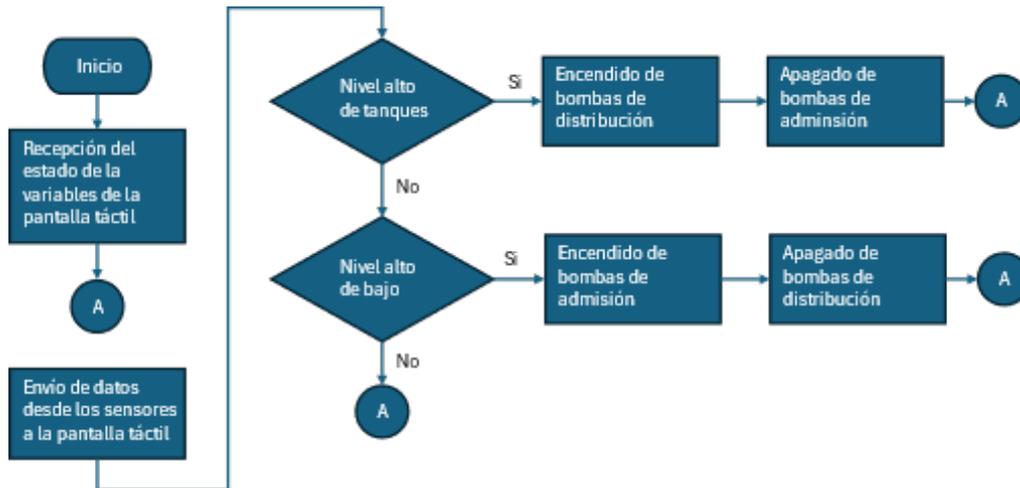
### 2.3. CRITERIOS PARA SELECCIONAR LOS DISPOSITIVOS NECESARIOS

Se debe tener en cuenta los siguientes criterios.

- Que los equipos sean capaces de controlar los procesos de control en la planta de agua.
- Compatibilidad entre los dispositivos seleccionados.
- Interfaz de comunicación industrial.
- Condiciones ambientales.
- Costos.

**Figura 1.**

Diagrama del Flujo del PLC.

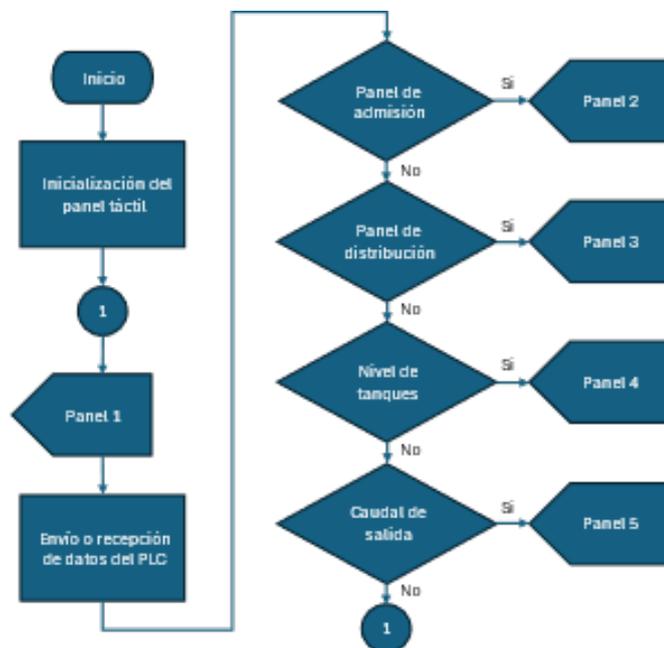


#### 2.4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PLC Y PANTALLA TÁCTIL

El PLC y el panel táctil son dispositivos que requieren programación para controlar y visualizar los estados de la planta. En la figura 1 se presenta un diagrama de flujo que explica el funcionamiento del PLC en este diseño. Además, proporcionamos un diagrama de flujo que muestra cómo operaría la interfaz gráfica a través de un dispositivo HMI.

**Figura 2.**

Diagrama de flujo del HMI



En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo que gobierna al software de la estación de trabajo o panel táctil, en donde se mostrarán las pantallas correspondientes a cada etapa dentro de la planta.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. FASE 1: ESTADO ACTUAL DE LA PLANTA

La planta de potabilización del GADMEE cuenta con las etapas mostradas en la Figura 3, en donde se encuentran conectados los controles y bombas instalados.

#### 3.2. FASE 2: DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN

Dentro de la automatización que se diseñó se proporcionó la arquitectura del sistema SCADA, en la Figura 4 se presentan tres de los cinco niveles de automatización, estos niveles corresponden a la supervisión, control y a los actuadores y sensores, dentro del nivel de supervisión se encuentran el servidor y el switch, en el nivel de control se presenta el PLC y un panel táctil los que se encargan de gobernar el comportamiento de la planta, por último, se presentan los actuadores para el control de las bombas y los sensores que recolectan los datos de la planta [1].

#### 3.3. FASE 3: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

En la Tabla 1 se muestran los dispositivos escogidos para la adquisición, el procesamiento, almacenamiento y visualización de datos, a continuación, se detallan:

- Controlador lógico programable.
- Sensores y actuadores.
- Dispositivos de comunicación.
- Servidores y estaciones de trabajo.

Se detalla que en la Tabla 2 y Tabla 3 se muestran los tiempos de respuesta de los operadores antes de la implementación de un sistema SCADA.

Figura 3.

Etapas de la planta de potabilización.

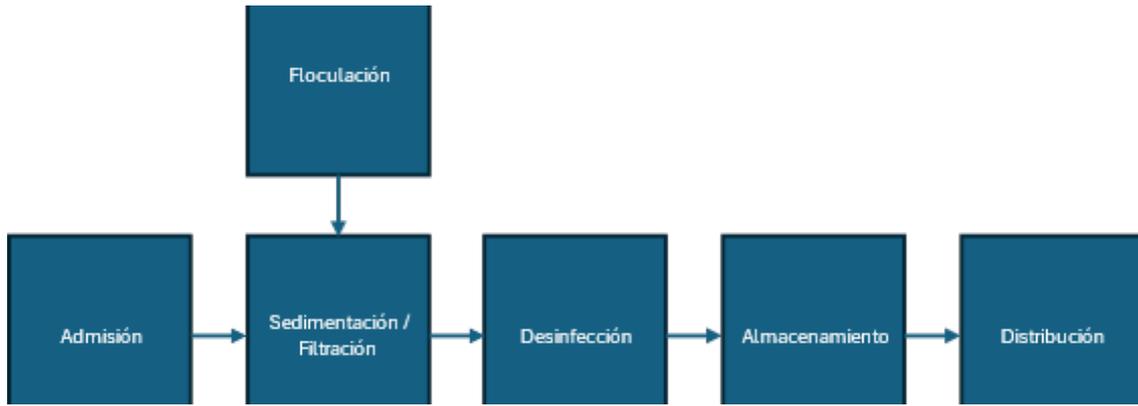


Figura 4.

Arquitectura del SCADA.

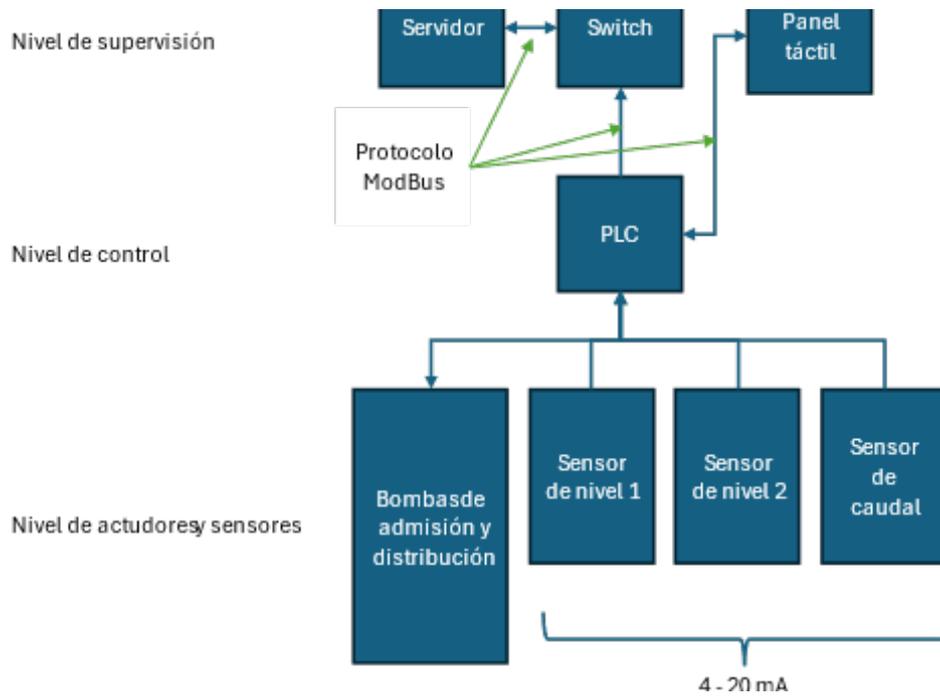
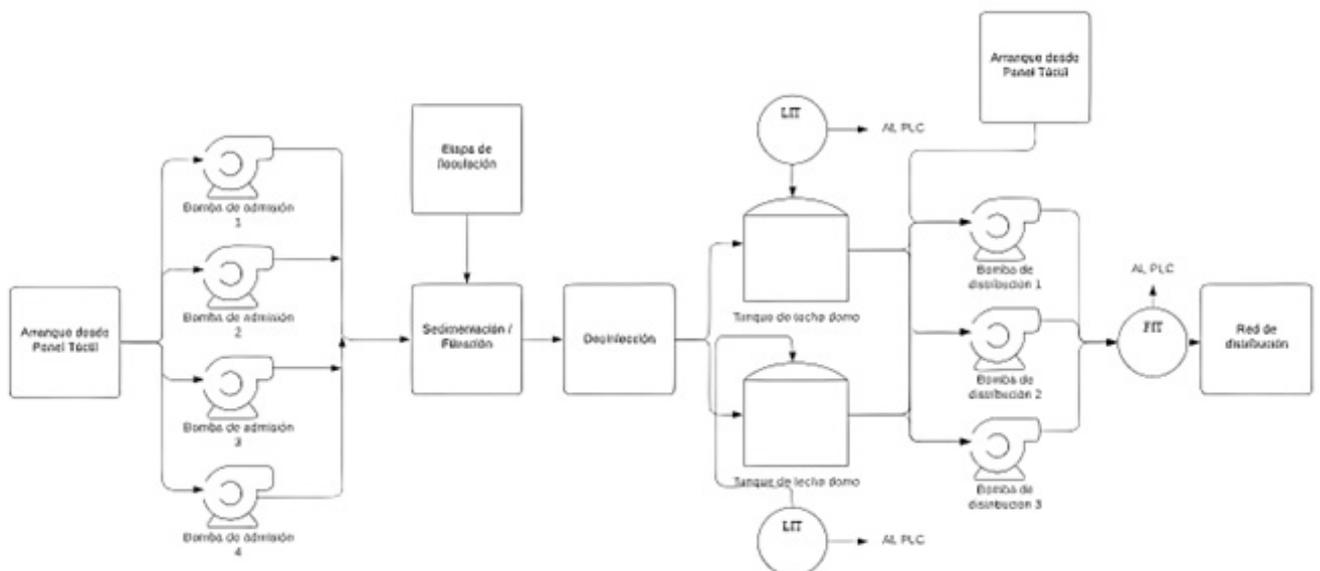


Figura 5.

Diagrama P&ID.



**Tabla 1.**

Dispositivos escogidos para la automatización

Ítem	Descripción	Cantidad
1	PLC TM221CE40R SCHNEIDER ELECTRIC	1
2	MÓDULO //INSERTE NOMBRE DEL MÓDULO// SCHNEIDER ELECTRIC	1
3	PANEL TACTIL HMISTU65S 3.2 INCH	1
4	SENSOR ULTRASÓNICO LVC-152 OMEGA ENGINEERING	2
5	SENSOR ELECTROMAGNÉTICO FMG600 OMEGA ENGINEERING	1
6	SERVIDOR POWEREDGE T40 DELL	1
7	SWITCH EDS-508A MOXA	1

**Tabla 2.**

Tiempos de respuesta de los operadores

Evento / Escenario	Encendido o apagado de las bombas de admisión	Encendido o apagado de las bombas de distribución	Detección de fallas en la admisión	Detección de las fallas en la distribución
Movilización caminando	8 a 10 min	4 a 6 min	escenario 10 min	10 min
Movilización en motocicleta	4 a 6 min	No aplica	10 min	10 min
Movilización en automóvil	4 a 7 minutos	No aplica	10 min	10 min

**Tabla 3.**

Tiempos de respuesta esperados de los operadores hacia el panel táctil del HMI

Evento / Escenario	Encendido o apagado de las bombas de admisión	Encendido o apagado de las bombas de distribución	Detección de fallas en la admisión	Detección de las fallas en la distribución
Movilización caminando	3 a 4 min	3 a 4 min	2 min	2 min
Movilización en motocicleta	No aplica	No aplica	2 min	2 min
Movilización en automóvil	No aplica	No aplica	2 min	2 min

### 3.3.1. P&ID del proceso

En la Figura 5 se muestra el diseño para implementar el sistema SCADA para supervisar y controlar los procesos de encendido y apagado de las bombas de admisión y distribución y los sensores de nivel y caudal. Este sistema se compone de un servidor, un switch de red, una pantalla HMISTU655, un PLC de la serie M221 de Schneider Electric, el que gestiona varios dispositivos de campo, entre ellos las bombas de admisión, las bombas de distribución, los sensores de nivel y caudal. Para la comunicación entre los dispositivos se emplea el protocolo ModBus TCP.

El protocolo ModBus TCP, fue seleccionado por su simplicidad y confiabilidad, facilitando la comunicación entre el servidor, el SCADA, el HMI, el PLC y los

dispositivos de campo, empleando cable UTP, se garantiza el flujo eficiente y seguro a lo largo de toda la red, lo que proporciona una solución económica y fácil de instalar, al igual que se reducen las interferencias electromagnéticas que puedan afectar la señal [4].

En este entorno, el sistema permite a los operadores supervisar y controlar los procesos en tiempo real mediante el HMI, mientras que el servidor recopila, procesa y almacena los datos para su análisis y mejora continua, el PLC desempeña un papel muy importante en la ejecución de lógica de control y la gestión de dispositivos de campo, asegurando que los bombas y sensores funciones de manera eficiente y coordinada.

En el diseño para la planta de tratamiento de agua del GADMEE, se han implementado los sensores LVC-152 y

MAG3100, junto a las cuatro bombas de admisión y tres bombas de distribución, las cuales están conectadas al PLC TM221CE16R, para monitorear y controlar el estado de la planta, los sensores MAG3100 son capacitivos, empleados para los dos tanques de distribución que tiene la planta.

Las bombas de admisión llevan el agua de la laguna de captación a la etapa de filtración y floculación, mientras que las bombas de distribución se encargan de entregar el agua tratada a los consumidores finales. Los dos conjuntos de bombas se conectan a las salidas digitales del PLC, el que es responsable de gestionar el funcionamiento de la planta. La conexión de los sensores y bombas al PLC y la configuración de los parámetros de entrada y salida en el programa del PLC garantizando el funcionamiento eficiente y confiable del sistema.

### 3.4. DISCUSIÓN

Durante la ejecución de la evaluación del estado operativo de la planta, se llevaron a cabo inspecciones, en donde se recopilaban los datos del proceso productivo, se logran identificar varios problemas, los cuales se mencionan a continuación:

- Las protecciones generales de los tableros de admisión y distribución no se encuentran en equilibrio, ya que las bombas instaladas son inferiores a la cantidad de bombas diseñadas para el sistema pues debido al daño de estas han sido deshabilitadas.
- El monitoreo de los tanques de almacenamiento se lo realiza de forma manual por un operador.

Los operadores experimentan tiempos de respuesta prolongados al realizar operaciones en las bombas de admisión y distribución como se aprecia en la Tabla 2. Esto se debe a la distancia entre la bodega y la oficina de la planta de potabilización de agua del GADMEE. En situaciones normales, los tiempos de reacción para la admisión varían entre 4 y 10 minutos. Sin embargo, al simular que la pantalla táctil se encuentra en la oficina de la planta, estos tiempos se reducen a un rango de 3 a 4 minutos desde la bodega, como se muestra en la Tabla 3. Esta mejora representa una disminución de 1 a 6 minutos en comparación con las condiciones habituales, lo que representa una mejora entre el 10% y el 60%. Además, las bombas se desactivarán casi instantáneamente, reduciendo el tiempo en que operan en condiciones desfavorables. La automatización permite monitorear y controlar procesos en tiempo real. Los operadores pueden supervisar las bombas, válvulas y otros equipos desde una ubicación central, reduciendo los tiempos de respuesta y mejorando la eficiencia [3], [5], [6], [7].

La automatización de la planta conlleva múltiples beneficios. No solo mejora la eficiencia operativa para el

personal de la planta, sino que también contribuye a la calidad del producto final, reduce los gastos y aumenta la seguridad tanto para el personal operativo como para los visitantes [6], [8].

Los PLC son una solución rentable y confiable para controlar sistemas complejos, lo que es crucial para la operación continua y segura de una planta de potabilización de agua. La flexibilidad operativa del sistema es otro aspecto importante que se destaca. La capacidad de ajustar y controlar diversos parámetros operativos a través de una interfaz gráfica en la pantalla táctil permite a los operadores responder rápidamente a las condiciones cambiantes y optimizar el proceso de tratamiento de agua. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también asegura una mejor calidad del agua tratada [9]. Implementar un SCADA con estas características puede mejorar significativamente la eficiencia y la calidad del proceso de potabilización, permitiendo una supervisión continua y precisa de los parámetros críticos del agua, y facilitando la toma de decisiones informadas para el mantenimiento y operación de la planta [10]. La implementación de este tipo de sistema en una planta de potabilización de agua puede resultar en una distribución de agua más eficiente y en ahorros significativos en la pérdida de agua. Las ventajas adicionales incluyen la reducción de la intervención humana, lo que minimiza errores y aumenta la precisión del control del sistema. La capacidad de monitoreo en tiempo real y la respuesta inmediata a problemas potenciales aseguran un suministro continuo y seguro de agua potable, lo cual es crucial para mantener la calidad del agua y la satisfacción del consumidor [11], [12]. La implementación de este SCADA inicia mejoras en otras etapas del proceso productivo de la planta, ofrece un punto de partida para otros estudios para esta planta, tales como un análisis de eficiencia energética y estudios de confiabilidad [13], [14].

El desarrollo del sistema SCADA también sirve de antesala para la incorporación de nuevas tecnologías relacionadas a la Industria 4.0, concepto moderno que representa una transformación digital de los sistemas de producción mediante la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT), big data, computación en la nube, manufactura aditiva, robótica avanzada, realidad aumentada, entre otras [15], [16]. Los sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) son componentes esenciales en esta evolución, especialmente en plantas potabilizadoras de agua, donde la eficiencia y la precisión son cruciales para la gestión de recursos hídricos.

La recopilación y análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real mejora significativamente la capacidad de monitoreo y control de los procesos de tratamiento de agua, optimizando la eficiencia operativa y reduciendo el consumo de energía y recursos. Los sistemas SCADA, cuando se integran con tecnologías de internet de las

cosas (IoT), facilitan la comunicación entre dispositivos y sistemas [17], [18], lo que permite una respuesta rápida y precisa a las variaciones en los parámetros de tratamiento del agua.

Otra ventaja clave es la posibilidad de implementar mantenimiento predictivo. Al analizar datos históricos y en tiempo real, los sistemas SCADA pueden proveer de datos para predecir fallos potenciales y programar intervenciones de mantenimiento antes de que ocurran averías costosas. Esto no solo minimiza el tiempo de inactividad, sino que también prolonga la vida útil de los equipos. El uso de algoritmos de aprendizaje automático en combinación con SCADA puede anticipar problemas y mejorar la fiabilidad del sistema [19], [20]. Pero, la interconectividad de los sistemas aumenta el riesgo de ataques cibernéticos. La integración de sistemas SCADA en infraestructuras críticas como las plantas potabilizadoras de agua requiere la implementación de medidas de seguridad robustas. Es importante adoptar estándares de ciberseguridad y prácticas de gestión de riesgos para proteger estos sistemas vitales contra amenazas externas e internas [21], [22].

La Industria 4.0 también promueve prácticas sostenibles mediante el uso de tecnologías avanzadas. En las plantas potabilizadoras de agua, los sistemas SCADA pueden ayudar a gestionar de manera eficiente los recursos hídricos, reducir el desperdicio y asegurar la calidad del agua suministrada.

#### 4. CONCLUSIONES

Con la finalización del proyecto se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El diseño de un sistema SCADA para la Planta de Potabilización de Agua del GADMEE ofrece diagramas de flujo versátiles para ejecutar la programación de los diferentes PLC disponibles en el mercado, ya que este documento ofrece un punto de partida para efectuar el control y monitoreo de la planta, ofreciendo mejoras en los tiempos respuesta ante fallas en el sistema.
- El realizar una simulación del modelo de automatización diseñado a lo largo de esta investigación tiene ventajas ya que por medio de las simulaciones se pueden detectar cuales pueden ser los posibles eventos que ocurrirán en la planta, a su vez ofreciendo una solución para estos eventos.
- Un análisis técnico y económico es de suma importancia para realizar cualquier diseño o mejora dentro de una planta industrial, de esta forma se evalúa cuál es la mejor solución tratando de tener los menores costos para la empresa sin interrumpir su crecimiento.
- La integración de sistemas SCADA en el marco de la Industria 4.0 ofrece múltiples beneficios, desde la optimización de procesos y el mantenimiento predictivo hasta la mejora de la seguridad y la sostenibilidad.

Estas tecnologías avanzadas no solo aumentan la eficiencia operativa de las plantas potabilizadoras de agua, sino que también contribuyen a la resiliencia y la sostenibilidad de los recursos hídricos, aspectos cruciales para el desarrollo sostenible de la Costa ecuatoriana.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Rezaei, P. Keshavarzi, and Z. Moravej, "Key management issue in SCADA networks: A review", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, n.º 1. Elsevier B.V., pp. 354-363, Feb. 01, 2017. doi: 10.1016/j.jestch.2016.08.011.
- [2] E. Luijijf, M. Ali, and A. Zielstra, "Assessing and improving SCADA security in the Dutch drinking water sector", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 4, n.º 3-4, pp. 124-134, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.ijcip.2011.08.002.
- [3] K. Saravanan, E. Anusuya, R. Kumar, and L. H. Son, "Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA", *Environ Monit Assess*, vol. 190, n.º 9, Sep. 2018, doi: 10.1007/s10661-018-6914-x.
- [4] G. Yadav and K. Paul, "Architecture and security of SCADA systems: A review", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 34. Elsevier B.V., Sep. 01, 2021. doi: 10.1016/j.ijcip.2021.100433.
- [5] R. R. R. Barbosa and A. Pras, "Intrusion Detection in SCADA Networks", 2010, pp. 163-166. doi: 10.1007/978-3-642-13986-4\_23.
- [6] D. Babunski, E. Zaev, A. Tuneski, and D. Bozovic, "Optimization methods for water supply SCADA system", in *2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, IEEE, Jun. 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/MECO.2018.8405970.
- [7] A. Panchal, K. Dagade, S. Tamhane, K. Pawar, and P. Ghadge, "Automated Water Supply System and Water Theft Identification Using PLC and SCADA", 2014. [Online]. Available: www.ijera.com
- [8] D. Ecob, "PLCs and SCADA - a water industry experience", in *IEE Colloquium on 'Application of Advanced PLC (Programmable Logic Controller) Systems with Specific Experiences from Water Treatment'*, IEE, 1995, pp. 6-6. doi: 10.1049/ic:19950742.
- [9] A. Archana and B. Yadav, "PLC & SCADA based automation of filter house, a section of Water Treatment Plant", in *2012 1st International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication & Networking*, IEEE, Dec. 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/ET2ECN.2012.6470057.
- [10] E. Ahmad Zaki Hamidi, M. Ridlo Effendi, and H. Ash Shiddiq, "Design and Implementation Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) of Sedimentation Process of Water Treatment Plant (WTP) by Using

- Raspberry Pi 3 B”, in *2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, IEEE, Jul. 2018, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICWT.2018.8527736.
- [11] H. A. Umachagi, P. Kulkarni, and M. Bilagikar, “Implementation of Automated Water Supply and Distribution using PLC and SCADA”, in *2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 1–3. doi: 10.1109/B-HTC50970.2020.9297887.
- [12] E. A. Z. Hamidi, T. Gustiana, M. R. Effendi, and P. A. M. Hambali, “Design and Implementation Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) of Flocculation Process of Water Treatment Plant (WTP) Using Raspberry Pi”, in *2019 IEEE 5th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, IEEE, Jul. 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICWT47785.2019.8978240.
- [13] D. Babunski, E. Zaeu, A. Tuneski, and D. Bozovic, “Optimization methods for water supply SCADA system”, in *2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, IEEE, Jun. 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/MECO.2018.8405970.
- [14] Andrade-Cedeño, R. (2020). Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID. *RIEMAT* 2019, 4, 50-62. <https://doi.org/10.33936/riemat.v4i2.2196>
- [15] Karnik, N., Bora, U., Bhadri, K., Kadambi, P., & Dhattrak, P. (2022). A comprehensive study on current and future trends towards the characteristics and enablers of industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100294>
- [16] Parashar, B., Sharma, R., Rana, G., Balaji, R.D. (2023). Foundation Concepts for Industry 4.0. In: Nayyar, A., Naved, M., Rameshwar, R. (eds) *New Horizons for Industry 4.0 in Modern Business. Contributions to Environmental Sciences & Innovative Business Technology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20443-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20443-2_3).
- [17] Nechibvute, A., & Mafukidze, H. D. (2023). Integration of SCADA and Industrial IoT: Opportunities and Challenges. *IETE Technical Review*, 41(3), 312–325. <https://doi.org/10.1080/02564602.2023.2246426>
- [18] Eden, P. et al. (2017). SCADA System Forensic Analysis Within IIoT. In: Thames, L., Schaefer, D. (eds) *Cybersecurity for Industry 4.0. Springer Series in Advanced Manufacturing*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9_4)
- [19] Suryadarma, E., & Ai, T. (2020). Predictive Maintenance in SCADA-Based Industries: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2(1), 57-70. <https://doi.org/10.24002/ijieem.v2i1.4368>
- [20] W. Udo and Y. Muhammad, “Data-Driven Predictive Maintenance of Wind Turbine Based on SCADA Data”, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 162370-162388, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3132684.
- [21] G. Falco, C. Caldera and H. Shrobe, “IIoT Cybersecurity Risk Modeling for SCADA Systems”, in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4486-4495, Dec. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2822842.
- [22] A. Sajid, H. Abbas and K. Saleem, “Cloud-Assisted IoT-Based SCADA Systems Security: A Review of the State of the Art and Future Challenges”, in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1375-1384, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2549047.



## Evaluación del Impacto de la Implementación de Techos Verdes en el Dimensionamiento de Sistemas de Alcantarillado Urbano

### Evaluation of the Impact of Green Roof Implementation on Urban Sewer System Sizing

Belén Shakira Tapia Montero |  Universidad Politécnica Salesiana-UPS, Quito-Ecuador  
Daysi Gabriela Barros Tuapante |  Universidad Politécnica Salesiana-UPS, Quito-Ecuador  
María Gabriela Soria Pugo |  Universidad Politécnica Salesiana-UPS, Quito-Ecuador

Recibido: 02/09/2024  
Recibido tras revisión: 30/9/2024  
Aceptado: 22/10/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Techos verdes, techos verdes extensivos, alcantarillado, sostenibilidad, escorrentía, software SWMM.

#### KEY WORDS

Green roofs, extensive green roofs, sewer systems, sustainability, runoff, SWMM software.

#### RESUMEN

Este artículo analiza el impacto de implementar techos verdes en cubiertas inaccesibles en la urbanización Ecovilla Challuabamba, Cuenca, Ecuador. Mediante el uso del programa SWMM, se comparó el sistema de alcantarillado convencional con uno que incorpora techos verdes, evaluando tormentas de diseño con periodos de retorno de 2 a 50 años. Para estimar la escorrentía, se utilizaron modelos como el Número de Curva, Horton y Green AMPT, considerando variables como clima, sustrato y pendiente. Los resultados muestran que los techos verdes reducen el caudal pico en un 44.5%, el calado en un 6.9% y la velocidad en un 38.1%, según el modelo de Número de Curva. Estos hallazgos sugieren que los techos verdes pueden mitigar inundaciones al disminuir la escorrentía superficial y permitir reducir el tamaño de las tuberías, destacando su potencial para aumentar la resiliencia urbana y promover la sostenibilidad en el desarrollo urbano.

#### ABSTRACT

This article analyzes the impact of implementing green roofs on inaccessible surfaces in the Ecovilla Challuabamba urbanization, Cuenca, Ecuador. Using the SWMM software, the conventional sewer system was compared with one that incorporates green roofs, evaluating design storms with return periods ranging from 2 to 50 years. Runoff estimation was performed using models such as the Curve Number, Horton, and Green AMPT, considering variables like climate, substrate type, and slope. The results show that green roofs reduce peak flow by 44.5%, water depth by 6.9%, and velocity by 38.1%, according to the Curve Number model. These findings suggest that green roofs can mitigate flooding by reducing surface runoff and potentially allowing for smaller pipe sizes. This highlights their potential to enhance urban resilience and promote sustainability in urban Development.

## I. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años se ha evidenciado el crecimiento poblacional a nivel global. En el caso particular del Ecuador, el incremento ha sido de 2.5 millones desde el 2010 a 2022 [1]. Este incremento se traduce en más construcciones y carreteras que conllevan a disminución de parques y zonas ajardinadas. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador: “Para 2012 el índice verde urbano en Ecuador fue de 13,01 m<sup>2</sup>/habitante, en relación al rango sugerido por

la Organización Mundial de la Salud (OMS) que es de 9 m<sup>2</sup>/habitante”. Asimismo, solo el 54% de las ciudades en el Ecuador cumplen con la recomendación de este organismo internacional [1]. La creciente impermeabilidad urbana reduce la vegetación nativa y altera el drenaje, aumentando la escorrentía y limitando la capacidad de absorción de agua, afectando así el ciclo hidrológico, lo que puede producir fallos en los sistemas de drenaje urbano que conlleva a desastres, como daños a la infraestructu-

ra, pérdidas económicas y fatalidades, exacerbados por la expansión agrícola, condiciones climáticas extremas y modificaciones en los patrones naturales de drenaje.

Una alternativa para aliviar los sistemas de drenaje es la implementación de techos verdes. Consiste en una losa cubierta por capa vegetal que abarca un drenaje, sustrato y la vegetación [2]. Según el tamaño del sustrato los techos verdes pueden clasificarse en extensivos, intensivos y semi intensivos. En el primer caso, los techos verdes extensivos se caracterizan por ser de peso ligero, y el espesor máximo es de 15 cm, no hay mucha diversidad de plantas y las que se utilizan generalmente son las suculentas, no requiere mantenimiento diario, y el costo de implementación es bajo [3]. Los techos verdes intensivos requieren mantenimiento constante; adicionalmente, su espesor es de al menos 20 cm, lo que permite tener una gran variedad de vegetación y una capacidad de almacenamiento alta de aguas lluvias, el peso que genera a la estructura debe ser considerado en el análisis de cargas [4]. Por último, los techos verdes semi intensivos se caracterizan por tener propiedades de los techos antes mencionados. Por ende, el espesor oscila entre 15 y 20 cm [5].

La vegetación utilizada en estos sistemas es en base al clima y la pluviometría de la zona, las capas que componen los techos verdes se indica en el Anexo-Figura 1.

La vegetación utilizada en techos verdes extensivos a nivel mundial son las suculentas (*Sedum pachyphyllum*), pensamientos (*Viola x wittrockiana*), bergenia (*Bergenia ciliata*), reseda (*Libolaria maritima*), sedum (diferentes variedades), lechuga batavia (*Lactuca sativa*), entre otras [7]. En Ecuador, de estas especies sobresalen las suculentas, las raíces de estas plantas tienden a ser poco profundas, pero muy extendidas lateralmente. Esto les permite absorber rápidamente el agua de lluvia ocasional y almacenarla en sus tejidos gruesos y carnosos, por lo tanto, tienen una alta resistencia a la sequía. En el mercado ecuatoriano hay gran variedad de estas plantas [6].

Es importante considerar que los techos verdes pueden implementarse en pendientes variadas, aunque la aplicación específica dependerá del objetivo deseado. Para enfocarse en la retención de agua, que es el caso por el cual se implementa en este estudio, se recomienda utilizar techos verdes en pendientes suaves de máximo 3%. Esto se debe a que las pendientes suaves permiten una distribución más uniforme del agua retenida, facilitando la absorción por parte de la vegetación y el sustrato, y minimizando el riesgo de erosión o pérdida de agua por escorrentía [8].

El almacenamiento de agua de lluvia en medios urbanos utilizando techos verdes tiene beneficios para los sistemas de drenaje urbano al permitir reducir los diámetros de las tuberías y su inclinación (López et al., 2020), lo que hace que el manejo de aguas pluviales sea más efectivo y sustentable. También, la implementación de techos verdes, puede permitir aprovechar las aguas

lluvias generadas por la escorrentía de estas cubiertas, reduciendo los costos de riego y apoyando al medio ambiente. De acuerdo con Camacho et al. (2020), México, en 2011, implementó techos verdes en el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda, lo que ofreció enormes ventajas para la naturaleza a través de la siembra de hortalizas, el empleo de compost de lombriz y la reutilización del agua de lluvia de macetas con la reducción de impuestos sobre el pago del agua [9], según varios estudios en el campo, se ha comprobado que la utilización de azoteas verdes en ámbitos urbanos tiene un papel muy importante en el manejo efectivo de las aguas pluviales, porque absorbe gran cantidad de estas, acumulándolas y liberándolas poco a poco para no sobrecargar el sistema de alcantarillado, con lo cual se minimizan los picos de escorrentía.

Existen investigaciones de cómo se podría mejorar la adaptación de los techos verdes al clima tropical andino. Galarza et al. (2017) estudiaron el comportamiento hidrológico de los techos verdes mediante un experimento con numerosas configuraciones de techos verdes, y los datos de veintiún eventos de lluvia recogidos. Los resultados mostraron que la combinación de la planta y la altura del sustrato podría marcar una diferencia en la reducción de la escorrentía.

La ciudad de Cuenca se encuentra ubicada al sur del Ecuador, en la depresión interandina, dentro de la cuenca del río Paute. Aunque el régimen de precipitaciones anuales es relativamente bajo comparado con otros sectores del Ecuador, los eventos de lluvias intensas son considerables. La intensidad máxima de precipitación puede alcanzar los 134 mm/h en 10 minutos para un periodo de retorno de 50 años [10]. Eventos extremos han generado escorrentía que no ha podido ser evacuada por los sistemas de drenaje de la ciudad. Es así que, por las intensas lluvias, el 23 de diciembre de 2023 se produjo un desborde del río Tomebamba, ocasionando el colapso del sistema de alcantarillado. Asimismo, el 04 de mayo de 2024 ocasionaron daños materiales en casas y locales comerciales aledaños a los ríos Tomebamba y Machángara. Por lo expuesto, la implementación de cubiertas verdes sería una solución viable para la mitigación de inundaciones dentro de la ciudad.

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto que tendría la implementación de techos verdes en la planificación de sistemas de alcantarillado urbano utilizando como caso de estudio una urbanización ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Para cumplir el objetivo, se realizó la modelación del sistema de alcantarillado de la Urbanización en el software Storm Water Management Model (SWMM) para comparar el sistema convencional de recolección de aguas lluvias y grises, con el nuevo sistema de detención de techos verdes, analizando los cambios en los hidrogramas para diferentes duraciones de tormenta con diferentes modelos de infiltración.

## 2. MÉTODO

Con base en el objetivo planteado, se ha realizado el análisis específico del sistema de alcantarillado de una urbanización que servirá como caso de estudio. Se ha considerado dos escenarios: el primero, que es la situación actual, el diseño de alcantarillado convencional combinado que se lo denominará como tradicional, y el segundo, la implementación de cubiertas verdes en los techos de las viviendas. Para la comparación de ambos casos se ha realizado la modelación de los sistemas en el software SWMM. El software de estudio es de acceso libre y gratuito; adicionalmente, su interfaz es muy amigable y de fácil manejo. Se ha utilizado como caso de estudio la urbanización Ecovilla Challuambamba, ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

### 2.1. CASO DE ESTUDIO

#### 2.1.1. Contexto climatológico, fitológico y social

Cuenca, se encuentra en la región sur del país, en la provincia del Azuay, en la parte occidental de la Cordillera de los Andes. Su ubicación geográfica precisa es en un valle interandino, rodeada por montañas y paisajes naturales impresionantes. Se sitúa a unos 2.500 metros sobre el nivel del mar, lo que le otorga un clima templado y agradable durante la mayor parte del año, con temperaturas moderadas.

La ciudad está atravesada por cuatro ríos principales: el Tomebamba, el Yanuncay, el Tarqui y el Machángara, lo que contribuye a su belleza natural y a la fertilidad de sus tierras.

En el cantón Cuenca se distinguen diferentes zonas morfológicas, entre ellas se destaca el valle interandino, que abarca el 25% de la superficie del cantón, está entre los 2.300 a 2.900 m s. n. m. Tiene una temperatura promedio anual que varía entre 18 y 22 °C y una precipitación media anual alrededor de 500 mm. En esta área, además de la ciudad de Cuenca, se asientan 19 cabeceras de las 21 parroquias rurales, y alberga alrededor del 98% de la población cantonal. De acuerdo con la información del censo al año 2022 tiene 596.101 habitantes [11].

En el cantón, la variedad de formaciones vegetales está influenciada por factores bióticos y abióticos, incluyendo procesos históricos, adaptaciones de organismos, interacciones entre especies, variaciones de altitud, pendientes, condiciones climáticas y barreras geográficas. Estos factores son cruciales para el desarrollo de los ecosistemas y microhábitats, contribuyendo a la amplia diversidad de flora en la región [11].

La familia Asteraceae destaca con especies endémicas, aunque no siempre son las más comunes. La familia Poaceae también es notable, especialmente en áreas conservadas, como el páramo a más de 2.900 m s. n. m. en la

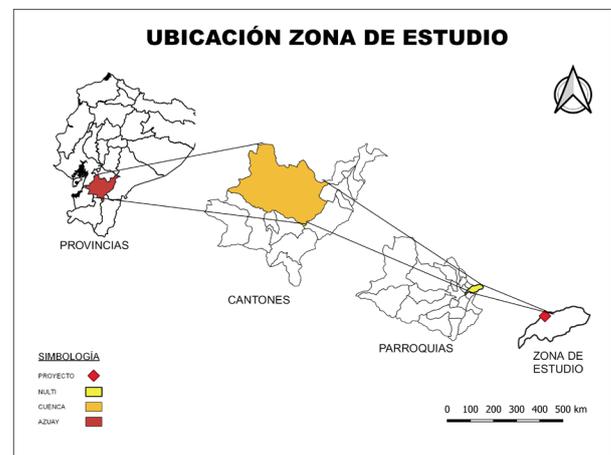
cordillera Occidental. Este ecosistema está dominado por pajonales de *Calamagrostis* sp. y *Gynoxys* sp., así como parches de *polylepis* cerca de montañas [11].

#### 2.1.2. Sitio de estudio

La urbanización Ecovilla Challuambamba está ubicada al este de la ciudad de Cuenca. Su superficie es de 6.040 m<sup>2</sup>. La urbanización se compone de 15 lotes, donde existen 7 casas tipo: vivienda 1, vivienda tipo A: 2, 4 y 6, vivienda tipo B: 3 y 5, vivienda 7, vivienda 8, vivienda tipo C: 9-14 y la vivienda 15. Todas las casas tienen una altura de 6.6 m, su distribución arquitectónica es planta baja, planta alta y la losa inaccesible (cubiertas impermeables) como se indica en la Figura 1 y en el Anexo-Figura 2.

**Figura 1.**

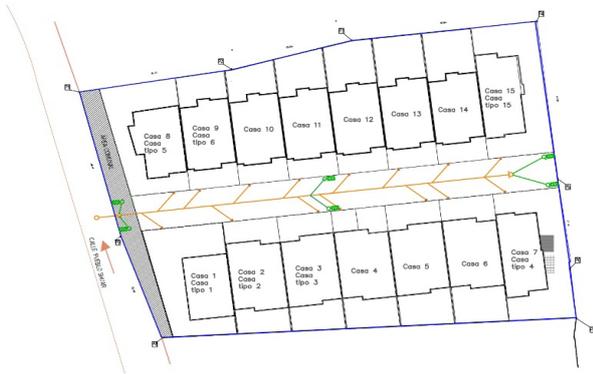
Provincia Azuay, cantón Cuenca, parroquia Nulti, zona de estudio Challuabamba.



El sistema de alcantarillado es combinado, es decir, confluyen caudales de aguas residuales y pluviales, el diámetro de la tubería principal es de 300 mm, y material PVC, la longitud es de 81.5 m y tiene una pendiente del 1%, además cuenta con acometidas domiciliarias y de sumideros, con diámetro de 200 mm y material de PVC.

**Figura 2.**

Diseño Sistema de alcantarillado urbanización Ecovilla. Elaborado por autores.



Nota: tubería colectora: alcantarillado combinado de PVC 300 mm (color amarillo), ramales de descarga: acometidas domiciliarias (color amarillo) y sumideros de PVC 200 mm (color verde). Elaborado por autores.

## 2.2. METODOLOGÍA

En este acápite se analizó la determinación del caudal, basado en una dotación de 120 litros por habitante por día, dado que se trata de una zona en proceso de urbanización sin variabilidad o crecimiento poblacional significativo, la población asignada para el cálculo se determinó de acuerdo con la densidad poblacional de la ciudad. Dado que el sistema de alcantarillado es combinado, para determinar el caudal sanitario se consideró el caudal de infiltración, de conexiones ilícitas y doméstico, y se obtuvo el caudal sanitario total de 2.385 lt/s, en cambio para determinar el caudal pluvial el diseñador consideró el método racional, en función del coeficiente de escorrentía, la intensidad de lluvia y el área de drenaje de la cuenca, obteniendo un valor de 105,86 l/s.

Con los caudales descritos se evaluó el diseño de la red de alcantarillado combinado con un diámetro comercial de 300 mm en la red principal, a esta descargan las aguas provenientes de las viviendas con un diámetro comercial de 200 mm.

El diseño consideró dos pozos para el mantenimiento y cambios de pendiente, como se observa en la Figura 5, que inicia en el costado derecho de la vía de la urbanización y el otro está ubicado a 81.5 metros, esto de acuerdo a la normativa de diseño nacional Norma CO 10.7-602 [12].

### 2.2.1. Intensidad - Curvas IDF

Para el análisis hidrológico, se seleccionó tormentas sintéticas con base en las curvas IDF de la estación meteorológica M0067 Cuenca-Aeropuerto, siguiendo las recomendacio-

nes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [10], que proporciona las siguientes ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación.

$$i = 201.93 * T^{0.1845} * t^{-0.4926} \quad (5 < 60) \quad (1)$$

$$i = 1052.78 * T^{0.1767} * t^{-0.892} \quad (60 < 1440) \quad (2)$$

Donde  $i$  es la intensidad de la lluvia de diseño (mm/h),  $T$  es el periodo de retorno (años) y  $t$  es el tiempo de duración (min).

A partir de las curvas IDF se consideraron periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. La obtención de las intensidades para cada periodo de retorno, cada 5 minutos de análisis, permitió la construcción del hietograma de diseño, utilizando el método de bloque alterno para duraciones de 10 min, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas.

Este proceso implicó organizar los valores de intensidad parcial de la precipitación obtenidos en función del tiempo. Para lograr esto, los valores de intensidad de precipitación parcial se ordenaron desde los más bajos en los extremos hasta los más altos en el centro. Esta técnica de alternancia garantizó una representación adecuada de la variabilidad espacial de la precipitación en el análisis hidrológico. La intensidad parcial alternada se ingresó en el software SWMM en función de los intervalos de tiempo de 5 minutos, cubriendo así el periodo completo de las duraciones de acuerdo a los eventos de precipitación descritos.

### 2.2.2. Configuración del modelo en el software SWMM

Se utilizó el software SWMM para modelar tanto el sistema de alcantarillado actual como los escenarios propuestos con techos verdes.

En SWMM, el modelado de un sistema de alcantarillado se realiza configurando primero la red de nodos y tuberías que forman el sistema. Cada nodo y tubería se define con propiedades físicas como elevación, tipo de conexión y características como diámetros, material y rugosidad. Se establecen condiciones iniciales de borde que afectan el comportamiento del sistema, como niveles de agua iniciales y entrada de caudal sanitario. Luego, SWMM realiza el análisis hidráulico simulando el flujo de agua a través de la red, calculando variables como velocidades y niveles de agua. Estas simulaciones fueron fundamentales para evaluar el comportamiento hidráulico (ver Anexo-Figura 3).

El primer escenario fue el diseño tradicional incorporando los hietogramas para cada duración 10 min, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas, con el fin de obtener los resultados de caudal con intervalos de 5 minutos y así comparar con los resultados que se obtendrán al implementar techos verdes.

El segundo escenario fue con la implementación de techos verdes tipo extensivos, ya que requieren menor mantenimiento y costo de implementación que los otros tipos de cubiertas verdes; se configuran las propiedades de la subárea en el menú del subcatchment ingresando el área del techo y otros parámetros asociados como el porcentaje de inclinación (1%), porcentaje de área impermeable (75%), además la conexión al módulo de LID control y método de estimación de la infiltración que para el caso de estudio fue con los que el software estima como Green y Ampt, Clásico Horton, Modificado Green y Ampt, y Número de Curva de Infiltración.

Para establecer los parámetros de techos verdes de manera específica en el sustrato se consideró el software Soil Water Characteristics [13], para la evaluación de las propiedades del suelo margo areno-arcilloso, taxonomía de suelos en el cantón Cuenca parte de la Clasificación del Soil Taxonomy, que fue desarrollada y coordinada internacionalmente por el Ministerio de Agricultura de los

Estados Unidos (USDA, acrónimo (en inglés) para el United States Department of Agriculture [11]. Este software proporciona datos detallados sobre la capacidad de infiltración del suelo, la retención de agua y otros parámetros relevantes. Incorporar estas propiedades del suelo en las simulaciones permitió una evaluación más precisa del rendimiento de sustratos y su impacto en la gestión del agua pluvial.

Los parámetros utilizados para la simulación del techo verde se indican en la Tabla 1.

Para los escenarios de simulación se utilizaron cuatro modelos hidrológicos de infiltración, que propone el software SWMM, considerando los siguientes parámetros de acuerdo a las condiciones de la zona de estudio (Tabla 2).

Esta simulación permitió una evaluación de los sistemas de alcantarillado para escenarios de 10 minutos, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas, lo que

**Tabla 1.**  
Parámetros utilizados en software SWMM para techos verdes

Parámetro	Valor	Descripción	
Sustrato superficial	Altura superficial	50 mm	Reflejar la presencia de suculentas, plantas comúnmente utilizadas en techos verdes extensivos.
	Fracción de volumen de vegetación	0.1	Indica la densidad de la vegetación en relación con el volumen total del sustrato.
	Rugosidad de Manning	0.05	Representa la resistencia superficial del sustrato.
	Pendiente	1%	Relación altura y longitud.
Suelo	Espesor	75 mm	Indica la profundidad del suelo utilizado en el techo verde.
	Porosidad	0.46	Representa el volumen de espacios porosos en el suelo.
	Capacidad de campo	0.25	Indica el contenido de agua del suelo cuando todos los poros están llenos.
	Punto de marchitez	0.11	Indica el contenido de humedad del suelo por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua con facilidad.
	Conductividad hidráulica	2.5 mm/h	Indica la capacidad de drenaje del suelo.
	Succión	88.9 mm/h	Señala la capacidad de almacenamiento del suelo en función de la tensión superficial del agua.
	Pendiente de conductividad	5	Hace referencia a cómo el suelo absorbe y drena el agua.
Material de drenaje	Espesor	25 mm	Indica la profundidad del material utilizado.
	Fracción de vacío	0.7	Representa el espacio disponible para que el agua fluya a través del material de drenaje.
	Rugosidad	0.3	Refleja la irregularidad de la superficie del material de drenaje, que afecta la velocidad de flujo del agua a través del sistema.

**Tabla 2.**

Parámetros utilizados en software SWMM para modelos de infiltración en los techos verdes

Método	Parámetro	Valor	Descripción
Green AMPT/ Modificado Green AMPT	Altura de succión	220 mm	Valor medio de la capacidad de succión capilar del suelo a lo largo del frente mojado [14].
	Conductividad	1.52 mm/h	Conductividad hidráulica del suelo completamente saturado [14].
	Déficit inicial	0.154	Diferencia entre la porosidad del suelo y la humedad inicial [14].
Horton	Tasa infiltración máxima	25 mm/h	Tasa máxima de infiltración en la curva de Horton (mm/h o in/h) [14].
	Tasa infiltración mínima	1.52 mm/h	Es equivalente a la conductividad hidráulica del suelo saturado [14].
	Constante de decaimiento	4	Constante de decaimiento del índice de infiltración para la curva de Horton (1/seg.) [14].
	Tiempo de secado	7 días	Tiempo necesario (en días) para que un suelo completamente saturado se seque [14].
	Volumen máximo	0.296	Máximo volumen de infiltración posible (0 si no es aplicable) [14].
Número de Curva	Número de curva	90	Este es el número de curva del SCS [14].
	Conductividad	1.52 mm/h	Conductividad hidráulica del suelo completamente saturado [14].
	Tiempo de secado	7 días	Tiempo necesario (en días) para que un suelo completamente saturado se seque [14].

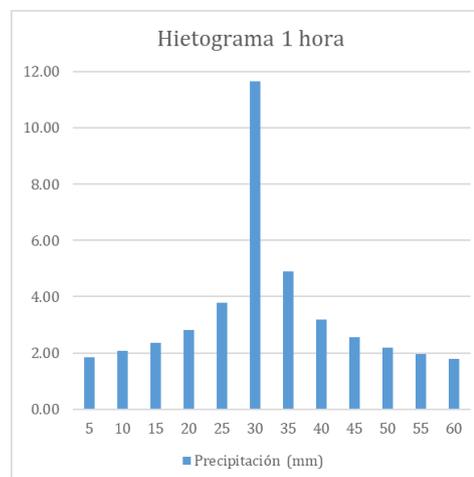
proporcionó información valiosa para comprender el impacto de la implementación de techos verdes en el dimensionamiento del sistema y su comportamiento hidráulico.

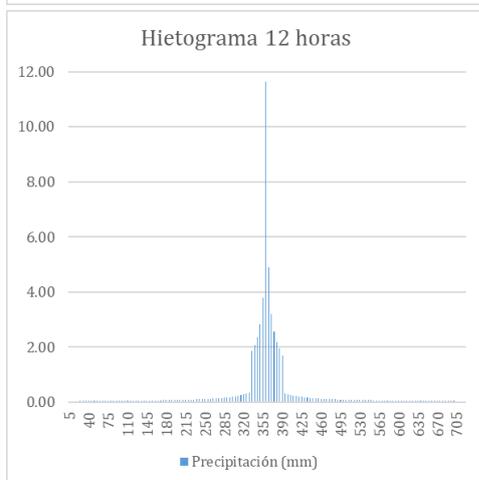
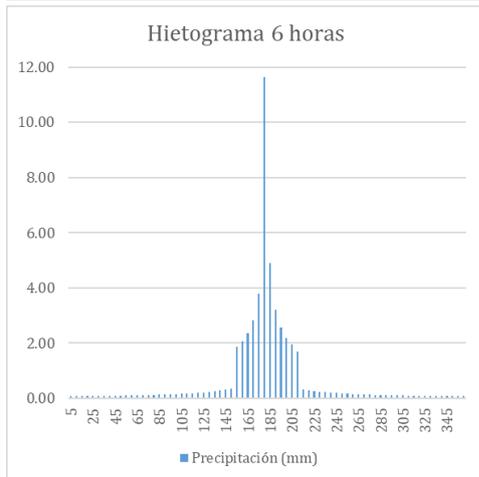
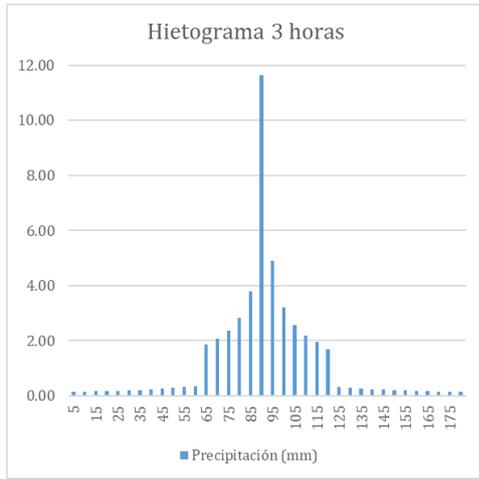
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar el análisis del método de bloque alterno, de acuerdo a las curvas IDF, se obtienen los hietogramas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. A continuación, se presentan las gráficas para un periodo de retorno de 10 años, ya que según normativa nacional e internacional es el tiempo recomendado de acuerdo al área y grado de protección del sistema.

**Figura 3.**

Hietogramas de diseño, método de bloque alterno (período de retorno 10 años).



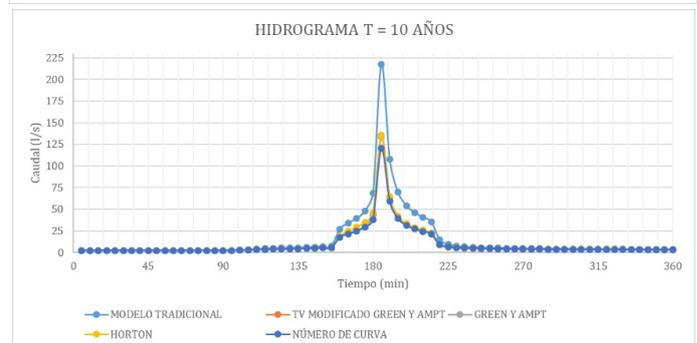
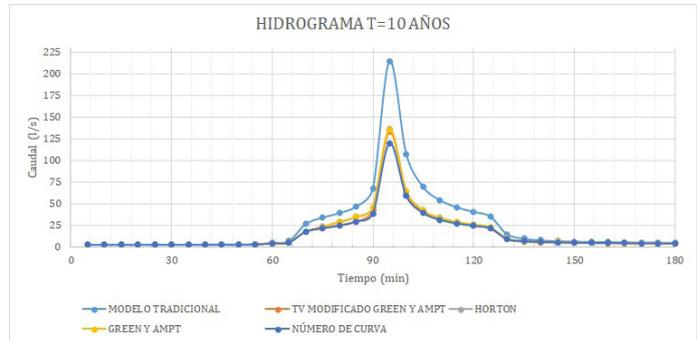
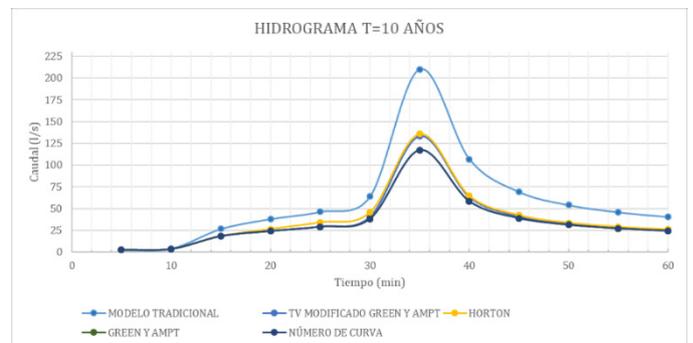


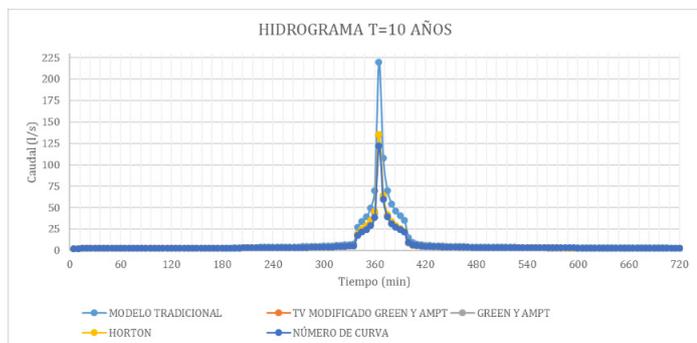
Se ha considerado las duraciones de tormentas de 1, 3, 6 y 12 horas; se descartó los valores de 10 minutos, ya que de acuerdo al análisis que presentan las ecuaciones del INAMHI, es válido desde 5 minutos y en el análisis para el bloque alterno se hizo desde tiempo 0 hasta 10 minutos con intervalos de 5 segundos, por lo que no se recomienda continuar con el análisis. Adicional, el hietograma de 24 horas arrojó valores de error superiores al 10% en el software SWMM, razón por la cual se descarta también esta duración.

En la Figura 3 se observa que las precipitaciones tienen un valor máximo de 11.65 mm. A medida que se amplía la duración de la tormenta, tanto los valores iniciales como los finales de las precipitaciones tienden a reducirse. Esto se debe a que, aunque las tormentas más cortas son más intensas, el volumen total de agua aumenta con la duración. Por ejemplo, la precipitación acumulada es de 41.09 mm en una hora, incrementándose a 53.60 mm en un período de 12 horas.

Con base en los modelos hidrológicos de infiltración analizados, considerando el periodo de retorno de 10 años y las duraciones de tormentas mencionadas se obtienen los hidrogramas a la salida del sistema de alcantarillado.

**Figura 4.**  
Hidrogramas - Periodo de retorno de 10 años.





En la Figura 4 se presenta los hidrogramas contemplando el tradicional y los techos verdes considerando diferentes modelos hidrológicos de infiltraciones, se evidencia una disminución significativa en el caudal pico al implementar los techos verdes por cualquiera de los métodos de infiltración, siendo el método de Número de Curva del SCS el que mayor reducción presenta.

Sin embargo, como se muestra en la figura el tiempo de duración de las tormentas no incide en el porcentaje de eficiencia de reducción de caudal, debido a que es una superficie muy pequeña de análisis donde el tránsito no es importante, por lo tanto, el hidrograma reacciona directamente con la precipitación. Para mayor análisis se detalla en la Tabla 3.

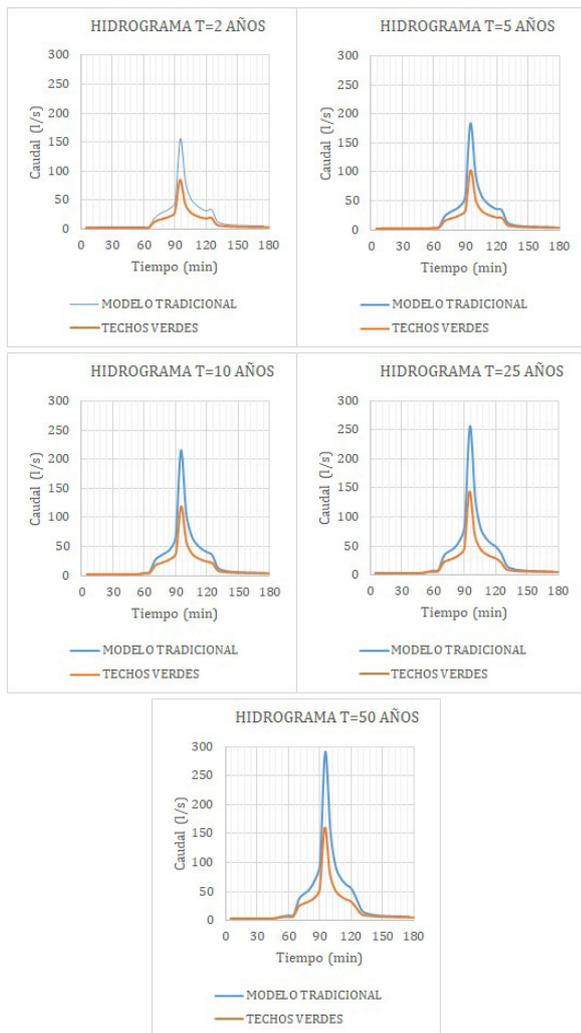
En la Tabla 3 se presentan todos los tiempos de retorno para comparar con las duraciones de tormenta, analizando la eficiencia de los techos verdes (Número de Curva). Se determina que, en promedio, el mayor porcentaje de reducción del caudal se da en una tormenta con una duración de 3 horas, alcanzando un 44,5%. Sin embargo, al examinar cómo varía el caudal pico en función de cada periodo de retorno, se observan pequeñas fluctuaciones sin una tendencia clara de aumento o disminución significativa. Este resultado sugiere que los techos verdes son efectivos en la reducción del caudal en una amplia gama de periodos de retorno.

**Tabla 3.**  
Porcentaje de reducción en el caudal Techo Convencional y Techos Verdes (Modelo Número de Curva)

Período de retorno	Caudal (l/s)											
	Duración de tormenta= 1 hora			Duración de tormenta= 3 horas			Duración de tormenta= 6 horas			Duración de tormenta= 12 horas		
	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)
T=2 Años	152.2	83.5	45.1	155.4	84.6	45.6	154.3	85.6	44.5	157.9	86.7	45.1
T=5 Años	179.9	101.0	43.9	183.5	102.9	43.9	185.9	104.2	43.9	188.3	105.5	43.9
T=10 Años	210.2	117.2	44.2	214.8	119.3	44.5	217.7	120.6	44.6	220.1	121.9	44.6
T=25 Años	252.4	142.1	43.7	255.9	144.5	43.5	257.5	145.7	43.4	259.0	146.8	43.3
T=50 Años	288.8	163.1	43.5	290.6	160.0	44.9	291.6	161.3	44.7	292.4	162.7	44.4

**Figura 5.**

Hidrogramas duración 3 horas - Diferentes periodos de retorno.



En la Figura 5 se observa los hidrogramas del modelo tradicional versus modelo con TV (Número de Curva) para los diferentes periodos de retorno en una duración de tres horas, en donde se aprecia la reducción del caudal pico en todos los eventos analizados, el porcentaje de reducción oscila de 43.5% al 44.9%, siendo el mayor para 50 años, no es un resultado significativo, ya que el porcentaje de reducción aumenta el 1.4%, por lo que se puede manejar diferentes periodos de retorno.

Además del caudal pico, también se ha realizado el análisis de otros parámetros que son importantes en el diseño de sistema de alcantarillado, como son el calado y la velocidad en las tuberías.

En la Tabla 4 se observa una reducción del calado al implementar techos verdes. Analizando los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, se registran disminuciones del 31%, 17.2% y 6.9%, respectivamente. Esto se debe a que el diámetro del tubo considerado en el proyecto fue diseñado para un periodo de retorno de 10 años, permitiendo que opere con flujo a gravedad. Sin embargo, para los periodos de retorno de 25 y 50 años, se requiere un diámetro mayor, lo que explica la ausencia de una reducción significativa del calado en estos casos, ya que la tubería en la simulación realizada trabaja a presión. Adicional, se observa que las cubiertas verdes pueden ralentizar el caudal de las aguas pluviales en comparación con las cubiertas convencionales. Para una tormenta con un periodo de retorno de 2 años, se estimó una disminución del 20% en la velocidad del flujo. En el caso de un periodo de retorno de 50 años, los techos verdes muestran una reducción en la velocidad del flujo del 45.7% en comparación con los techos convencionales. Esta reducción en la velocidad del flujo se debe a la disminución del caudal pico lograda mediante la implementación de techos verdes, ya que la velocidad del flujo está directamente relacionada con el caudal.

**Tabla 4.**

Parámetros de calado, velocidad y capacidad de tuberías en una duración de tormenta de 3 horas

Período de retorno	Calado (m)		
	Techos convencionales	Techos verdes	Porcentaje de reducción (%)
T=2 años	0.29	0.2	31.0%
T=5 años	0.29	0.24	17.2%
T=10 años	0.29	0.27	6.9%
T=25 años	0.29	0.29	0.0%
T=50 años	0.29	0.29	0.0%
Período de retorno	Velocidad (m/s)		
	Techos convencionales	Techos verdes	Porcentaje de reducción (%)
T=2 años	2.4	1.92	20.0%
T=5 años	2.84	1.95	31.3%
T=10 años	3.33	2.06	38.1%
T=25 años	3.97	2.45	38.3%
T=50 años	4.51	2.45	45.7%

#### 4. CONCLUSIONES

En conclusión, la implementación de cubiertas verdes en la urbanización Ecovilla Challuambamba en Cuenca, Ecuador, demuestra ser una solución efectiva y sostenible para la gestión de aguas pluviales. En el análisis del sistema de alcantarillado, se evaluaron dos escenarios: uno con el diseño tradicional y otro con techos verdes. Utilizando el software SWMM, se modelaron ambos sistemas para comparar su comportamiento hidráulico bajo diferentes condiciones de lluvia. Los parámetros específicos de los techos verdes se determinaron utilizando el software Soil Water Characteristics del USDA, adaptando las propiedades del suelo local. La simulación mostró que la implementación de cubiertas verdes puede reducir el caudal pico y mejorar la gestión del agua pluvial, sugiriendo que esta solución es efectiva y sostenible para diferentes proyectos.

Los resultados indican que la instalación de techos verdes impacta significativamente en la atenuación del caudal al retener el agua de las precipitaciones en su capa vegetativa y en el sustrato en alrededor del 44.5%. También se evidencia una reducción en calado de 6.9%, y velocidad en 38.1%. Esto puede contribuir a la gestión de aguas pluviales en áreas urbanas al reducir la velocidad y volumen de agua que fluye directamente hacia los sistemas de drenaje. Al absorber y retener el agua de lluvia, los techos verdes ayudan a mitigar el riesgo de inundaciones urbanas al disminuir la carga de agua que podría saturar rápidamente las alcantarillas y provocar desbordamientos.

Es importante destacar que los resultados obtenidos varían según la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia. En este artículo se ha analizado para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años y se pudo observar que para los más críticos, 25 y 50 años, hay una reducción del volumen al implementar techos verdes, del 60% y 57.1%, respectivamente, lo que permitiría dimensionar tuberías de menores diámetros.

En el análisis de los modelos de infiltración se escogió el número de curva que destaca por su capacidad para estimar la infiltración basado en el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la intensidad de la lluvia. Este enfoque puede llevar a una gestión más eficaz de las aguas pluviales en entornos urbanos, mitigando los riesgos de inundaciones y mejorando la sostenibilidad ambiental.

En resumen, la falta de una regulación que hable acerca de la inclusión de techos verdes no deja de fomentar la degradación urbanística que implica, hasta el momento, incluir una solución viable para la mitigación de inundaciones dentro de las ciudades, sucediendo que la implementación de techos verdes no deja de ser sino un remedio paliativo, el cual se puede ejecutar para mejorar la situación planteada.

Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar los efectos de los techos verdes en diferentes condiciones climáticas y geográficas, así como su viabilidad

económica y ambiental a largo plazo. Estos datos pueden proporcionar información valiosa para mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras urbanas frente al cambio climático y otros desafíos emergentes.

#### REFERENCIAS

- [1] A. y T. E. Ministerio del Ambiente, «Dirección de Comunicación Ministerio del Ambiente», 21 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-fomenta-la-construccion-ciudades-verdes-saludables/#>.
- [2] Rodríguez Emmanuel, Villagra Karolina, «Evaluación de un techo verde bajo eventos de precipitación sintéticos para caracterizar el comportamiento del flujo por escorrentía», 2019. [En línea].
- [3] Lanarc Consultants Ltd, Kerr Wood Leidal Associates Ltd., and Ngan, G., «Stormwater Source Control Design Guidelines 2005», 2005. [En línea]. Available: [http://www.metrovancouver.org/about/publications/Publications/Storm\\_Source\\_Control\\_P](http://www.metrovancouver.org/about/publications/Publications/Storm_Source_Control_P).
- [4] B. Woods-Ballard, R. Kellagher, P. Martin, C. Jefferies, R. Bray y P. Shaffer, Site handbook for the construction of SUDS, Londres: Ciria, 2007.
- [5] Groundwork Sheffield and Environment Agency, «The GRO green roof code», 2011. [En línea]. Available: <http://www.thegreenroofcentre.co.uk/Library/Default/Documents/GRO%20ONLINE.pdf>.
- [6] J. Aguillón y G. Arista, «ResearchGate-Monitoreo y Simulaciones del Hábitat», 2016. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/337620911\\_Monitoreo\\_y\\_Simulaciones\\_del\\_Habitat](https://www.researchgate.net/publication/337620911_Monitoreo_y_Simulaciones_del_Habitat).
- [7] Galarza et al., «Propuesta de mejoramiento tecnológico de techos verdes para el clima tropical andino». *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, p. 99, 2017.
- [8] K. Luckett, *Green Roof Construction and Maintenance*, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2009.
- [9] Camacho et al., «Techos verdes: una estrategia sustentable Green». *Tecnología en Marcha*, p. 79, 2020.
- [10] INAMHI, Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación, Quito, 2015.
- [11] Alcaldía de Cuenca, Dirección de Planificación, «Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cuenca», 2022. [En línea]. Available: [https://www.cuenca.gob.ec/sites/default/files/planificacion/1\\_4\\_Documentos%20complementarios%20del%20PDOT\\_07\\_01\\_2022.pdf](https://www.cuenca.gob.ec/sites/default/files/planificacion/1_4_Documentos%20complementarios%20del%20PDOT_07_01_2022.pdf).
- [12] Secretaría del Agua. Normas de Diseño para Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, Disposición de Excretas y Residuos Líquidos en el Área Rural, Quito, 1992.

- [13] Servicio de Investigación Agrícola USDA, «Laboratorio de hidrología y teledetección: Beltsville, MD», 2016. [En línea]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492&modecode=80-42-05-10>.
- [14] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Manual del Usuario, SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 vE, National Risk Mangement Research Laboratory, 2005.



# REVISTA INGENIO

## Comportamiento Sísmico y Propuesta de Reforzamiento de Edificios de Hormigón Armado Esquineros en Portoviejo, Ecuador

### Seismic Behavior and Retrofitting Proposal for Reinforced Concrete Corner Buildings in Portoviejo, Ecuador

Ronny Jahidan Jiménez Rodríguez |  Universidad Técnica de Manabí- UTM, Manabí - Ecuador

Brian Jordano Cagua Gómez |  Universidad Técnica de Manabí- UTM, Manabí - Ecuador

Recibido: : 16/9/2024  
Recibido tras revisión: 9/10/2024  
Aceptado: 21/10/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Comportamiento sísmico, edificios esquineros, reforzamiento estructural, pórticos de acero, mampostería.

#### KEY WORDS

Seismic behavior, corner buildings, structural retrofitting, steel frames, masonry.

#### RESUMEN

Este estudio analiza el comportamiento sísmico de edificios esquineros de hormigón armado de mediana altura (4 pisos) en Portoviejo, Ecuador, y propone un método de reforzamiento que combina pórticos de acero con diagonales excéntricas y enchapado de mampostería. Mediante un levantamiento in situ, se identificaron las características geométricas y arquitectónicas típicas de estas edificaciones, y se desarrolló un modelo estructural representativo al que se aplicaron cinco enfoques de modelación para evaluar su respuesta sísmica. Los resultados demuestran que la inclusión de la mampostería en los cálculos estructurales modifica significativamente la rigidez del sistema. El mecanismo de reforzamiento propuesto mejora la distribución de rigideces, mitiga los efectos de torsión y reduce la demanda de acero en elementos de hormigón, incrementando la seguridad y estabilidad de las edificaciones. Aunque el enfoque cumple con los límites normativos establecidos y presenta una solución eficaz para mejorar la resistencia y rigidez lateral de las estructuras, es esencial evaluar la proporción óptima entre la cantidad de muros reforzados y el aporte de las diagonales de acero. Además, se recomienda realizar comprobaciones mediante análisis no lineales para determinar el impacto de emplear dos sistemas estructurales en la respuesta estructural y prevenir posibles problemas en el comportamiento inelástico.

#### ABSTRACT

This study analyzes the seismic behavior of medium-rise (4-story) corner reinforced concrete buildings in Portoviejo, Ecuador, and proposes a retrofitting method that combines steel frames with eccentric bracing and masonry overlays. Through an in-situ survey, the typical geometric and architectural characteristics of these buildings were identified, and a representative structural model was developed, to which five modeling approaches were applied to evaluate the seismic response. The results demonstrate that incorporating masonry in structural calculations significantly modifies the stiffness of the system. The proposed retrofitting mechanism enhances the stiffness distribution, mitigates torsional effects, and reduces the required steel reinforcement in concrete elements, thereby increasing the safety and stability of buildings. Although this approach complies with established regulatory limits and presents an effective solution to enhance the lateral strength and stiffness of structures, it is essential to evaluate the optimal proportion between the number of reinforced walls and the contribution of steel eccentric braces. Furthermore, it is recommended to conduct verifications using nonlinear analyses to determine the impact of employing two structural systems on the structural response and to prevent potential issues with inelastic behavior.

## I. INTRODUCCIÓN

Los terremotos han sido responsables de devastadoras pérdidas humanas y económicas a lo largo de la historia, afectando regiones con alta actividad sísmica en todo el mundo. América Central y del Sur, por su ubicación geográfica, están particularmente expuestas a este tipo de desastres naturales [1]. En este contexto, Ecuador, ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico, es una de las regiones con mayor actividad sísmica, debido prin-

cipalmente a las fuentes sísmicas de subducción (interplaca e intraplaca) y fuentes corticales superficiales [2]. El país ha experimentado eventos sísmicos significativos que han resultado en considerables daños materiales y humanos, como el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016 [3].

Entre los efectos más críticos del movimiento sísmico se encuentra la torsión en edificios, un fenómeno

particularmente destructivo en construcciones esquineras. La distribución irregular de las paredes de mampostería en planta provoca una desigualdad en la rigidez del sistema estructural [4], lo que da lugar a vibraciones torsionales amplificadas que incrementan la vulnerabilidad estructural [5]. Estudios previos han documentado este problema en diversos sismos, como el de Puebla en 2017 y el de Michoacán en 1985, donde un alto porcentaje de los edificios esquineros colapsaron debido a la combinación de torsión y debilidad en los pisos inferiores [5].

El sismo de magnitud  $M_w=7.1$  ocurrido en Puebla, México, el 19 de septiembre de 2017, ilustra claramente este problema. Este sismo, de tipo intraplaca, con una profundidad de 57 km, afectó gravemente a las estructuras en la región. De las 270 edificaciones evaluadas, el 25.9% eran edificios esquineros, y se observó que la mayoría de ellos presentaban muros de mampostería en dos de sus lados perimetrales, lo que exacerbó los efectos de torsión [6].

De manera similar, el terremoto de Michoacán, México, ocurrido el 19 de septiembre de 1985, sigue siendo uno de los eventos más instructivos en la historia de la ingeniería sísmica mundial, no solo en México. En este evento, se observó una alta incidencia de fallas en edificios esquineros, debido a la combinación de torsión y debilidad en los pisos inferiores. Del total de colapsos registrados en la Ciudad de México, más del 40% correspondió a edificios en esquina, que fallaron por el efecto combinado de torsión y piso débil [7].

La ciudad de Portoviejo, Ecuador, situada en una región de alta sismicidad dentro del cinturón de fuego del Pacífico, enfrenta un riesgo considerable debido a la elevada vulnerabilidad de sus estructuras. El terremoto de Pedernales, ocurrido el 16 de abril de 2016, evidenció esta fragilidad al provocar el colapso de numerosas construcciones ubicadas en esquinas de calles [8], especialmente aquellas con amplias aberturas en sus fachadas que redujeron su rigidez estructural [9]. En un contexto donde las zonas costeras de Sudamérica han sido testigos de eventos sísmicos intensos, la importancia de desarrollar soluciones efectivas de reforzamiento para mejorar la resiliencia de estas estructuras es crucial. A pesar del creciente interés en el comportamiento sísmico de edificaciones en diversas partes del mundo, persiste una significativa brecha de conocimiento en lo que respecta a los edificios esquineros de hormigón armado de mediana altura en Portoviejo, así como en las alternativas de reforzamiento adecuadas para mitigar su vulnerabilidad. Esta investigación se propone abordar esta brecha mediante el análisis detallado del comportamiento sísmico de dichas estructuras y se presenta una propuesta de estrategias de rehabilitación efectivas.

La pregunta central que guía este estudio es: ¿Cuál es el comportamiento sísmico esperado de las edificaciones de hormigón armado esquineras de mediana altura

(4 pisos) en Portoviejo, Ecuador, y cómo se ven afectadas estas estructuras por el reforzamiento mediante pórticos de acero con arriostramientos excéntricos y enchapado de mampostería bajo cargas sísmicas? El objetivo principal de esta investigación es evaluar el comportamiento sísmico de dichas estructuras y proponer estrategias de rehabilitación que mejoren su resiliencia frente a eventos sísmicos.

La alta sismicidad de Portoviejo, sumada a la prevalencia de construcciones informales, aumenta considerablemente los niveles de vulnerabilidad sísmica en la ciudad. Una de las formas más efectivas de mitigar esta vulnerabilidad es a través de la implementación de alternativas de reforzamiento estructural que cumplan con los requisitos mínimos establecidos por la norma de construcción sismo resistente del país (NEC). En Ecuador, es común el uso de pórticos duales como sistemas de resistencia a cargas laterales; estos pórticos combinan elementos resistentes a momentos con diagonales que pueden ser concéntricas o excéntricas, según las especificaciones del arquitecto o ingeniero responsable [10].

Entre las técnicas de reforzamiento, los pórticos con arriostramientos excéntricos, particularmente la viga enlace o eslabón de cortante, juegan un papel crucial como primera línea de defensa en la estructura; su capacidad influye directamente en el desempeño del resto de los elementos estructurales [11]. Estudios previos han demostrado que los edificios que incorporan pórticos con arriostramientos excéntricos (EBF) ofrecen una combinación de alta rigidez en el rango elástico con excelente ductilidad y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico [12].

Por otro lado, el enchapado de mampostería se presenta como un mecanismo de reforzamiento que incrementa la rigidez de los pórticos ante cargas laterales y aumenta la resistencia general de la estructura [13]. Este sistema ha sido implementado con éxito en varios países de Latinoamérica, como México, Argentina y Perú, demostrando un comportamiento eficaz frente a cargas laterales. Investigaciones respaldan que este método de rehabilitación, cuando se aplica correctamente, no solo aumenta la resistencia ante cargas laterales, sino que también incrementa la rigidez remanente, la capacidad de deformación y la disipación de energía de la estructura [14]. El objetivo es mejorar la capacidad de resistencia y rigidez de estos edificios ante eventos sísmicos, minimizando los daños y asegurando la seguridad de los ocupantes.

La escasez de estudios específicos sobre el comportamiento sísmico de edificios esquineros de mediana altura en Portoviejo, junto con la falta de técnicas de reforzamiento adecuadas, subraya la necesidad de esta investigación. Comprender mejor cómo se comportan estas estructuras durante los sismos y evaluar la eficacia de los sistemas de reforzamiento propuestos permitirá establecer pautas y recomendaciones prácticas para el diseño y construcción de

edificaciones más seguras y resilientes en Portoviejo y en otras áreas con riesgo sísmico elevado. Esta investigación contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería sísmica, proporcionando una base para la toma de decisiones en cuanto a la protección y reforzamiento de edificios de hormigón armado esquineros de mediana altura.

## 2. MÉTODO

### 2.1 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Este estudio se enfoca en el análisis cuantitativo del comportamiento sísmico de un arquetipo representativo de edificios esquineros de mediana altura (4 pisos) en la ciudad de Portoviejo, Ecuador. Se realizó un levantamiento de datos *in situ* para identificar las características geométricas y arquitectónicas clave de las edificaciones representativas. Se emplearon herramientas de medición y registro fotográfico para documentar la distribución arquitectónica, las secciones transversales de los elementos estructurales y otros detalles relevantes. Algunas de estas edificaciones esquineras en Portoviejo se ilustran en la Figura 1.

**Figura 1.**

Tipología de edificios esquineros ubicados en la ciudad de Portoviejo.



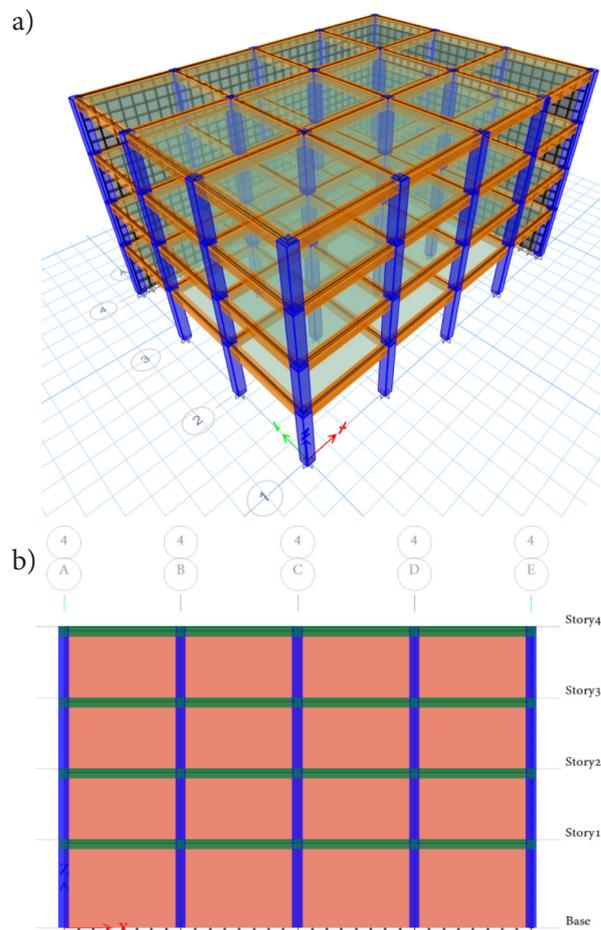
El arquetipo seleccionado, ubicado en una esquina de una zona céntrica entre la avenida Manabí y la avenida Quito, fue elegido por su representatividad en términos de tipología arquitectónica y estructural, típicamente utilizada para fines comerciales. El edificio se caracteriza por tener una planta baja de mayor altura y aberturas significativas en los lados que dan a las vías, lo que genera una distribución inadecuada de rigidez. Este arquetipo fue modelado y analizado para evaluar su respuesta sísmica.

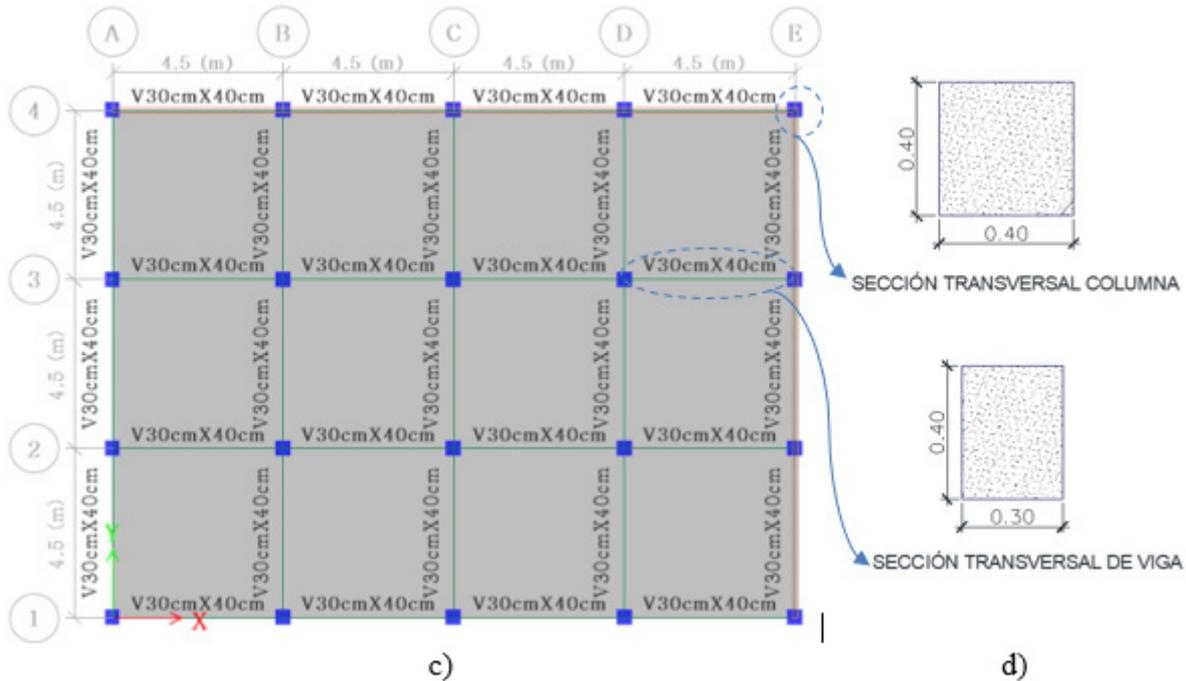
### 2.2. MODELADO COMPUTACIONAL

La edificación seleccionada para el análisis es de hormigón armado y consta de cuatro niveles. La planta baja tiene una altura de 3.50 m, mientras que los pisos superiores tienen una altura de 2.80 m. La estructura está conformada por pórticos con cuatro vanos de 4.50 m en la dirección X y tres vanos de 4.50 m en la dirección Y. Las losas alivianadas tienen un espesor de 0.20 m, las vigas tienen secciones de 0.30 m x 0.40 m, y las columnas poseen una sección transversal de 0.40 m x 0.40 m (ver Figura 2). Las cargas consideradas en el análisis estructural incluyen una carga permanente de 0.28 tonf/m<sup>2</sup> y una carga temporal de 0.07 tonf/m<sup>2</sup> en la cubierta, una carga permanente de 0.28 tonf/m<sup>2</sup> y una carga temporal de 0.25 tonf/m<sup>2</sup> en las losas de entrepiso.

**Figura 2.**

Edificación sin reforzar: a) modelo tridimensional; b) vista en elevación; c) vista en planta; d) sección transversal de vigas y columnas.





En este estudio se realiza un análisis tridimensional de la edificación, utilizando varios modelos estructurales. El primer modelo representa la estructura sin reforzar, donde las columnas y vigas se modelan mediante elementos tipo barra (frame), y las losas se representan con elementos bidimensionales tipo placa (shell). El segundo modelo considera la misma estructura, pero incorpora la mampostería de relleno, modelada también con elementos tipo shell, para capturar su contribución a la rigidez y su influencia en el comportamiento estructural. Posteriormente, se desarrollará un tercer modelo que integra el esquema de reforzamiento propuesto, incluyendo mamposterías enchapadas y la adición de pórticos externos de acero con diagonales excéntricas (modelados como frame), con el objetivo de evaluar su efecto en la mejora del comportamiento sísmico. Este enfoque se detalla más adelante en el artículo. Los modelos estructurales desarrollados intentan representar fielmente las características mecánicas y geométricas de los edificios esquineros en la ciudad de Portoviejo, y los primeros enfoques se presentan para que el lector pueda apreciar cómo la inclusión de la mampostería afecta el análisis y modifica el comportamiento estructural. Las aberturas de puertas y ventanas en las paredes de mampostería no fueron consideradas en el presente estudio ya que introduce una serie de complicaciones adicionales al modelado [15] with one solid wall and three walls with openings bounded by reinforced-concrete (RC, las cuales exceden el alcance del presente trabajo.

El modelado computacional de los elementos de hormigón armado se realizó siguiendo las directrices de la NEC SE CG, DS y HM (2015) [16], [17], [18], teniendo en cuenta los efectos de agrietamiento en los elementos estructurales. Estas consideraciones se aplicaron en función

de las recomendaciones establecidas para el análisis sísmico de estructuras de hormigón armado, asegurando que la rigidez efectiva de los elementos refleje adecuadamente la presencia de agrietamientos.

El análisis estructural se llevó a cabo utilizando un enfoque de análisis lineal elástico, implementando métodos simplificados de análisis estático equivalente y modal espectral. Este enfoque permite evaluar las respuestas sísmicas bajo condiciones simplificadas (ver espectro inelástico en la Figura 3), proporcionando una visión general del comportamiento de la estructura durante eventos sísmicos sin considerar la no linealidad material o geométrica y asumiendo condiciones estáticas. El propósito de este análisis es comparar las derivas inelásticas, la distribución de fuerzas y verificar la resistencia de los elementos estructurales. Estas metodologías tradicionales ofrecen un punto de partida para evaluar tanto la condición original de la edificación como la propuesta de reforzamiento, permitiendo un análisis preliminar efectivo antes de abordar análisis más complejos o detallados en un futuro trabajo.

### 2.3. ESPECTRO DE DISEÑO

La aceleración espectral se determinó utilizando el espectro de diseño establecido por la NEC-SE-DS (2015) [17]. La edificación se considera emplazada en una zona con suelo clasificado como M4, según la microzonificación sísmica de la ciudad de Portoviejo [19], lo que corresponde a un suelo tipo D de acuerdo con la velocidad de onda de corte indicada en la norma nacional [17]. A continuación, se presentan los factores debido al tipo de suelo y zona sísmica ( $F_a$ ,  $F_d$  y  $F_s$ ), junto con otros parámetros utilizados en el análisis, en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

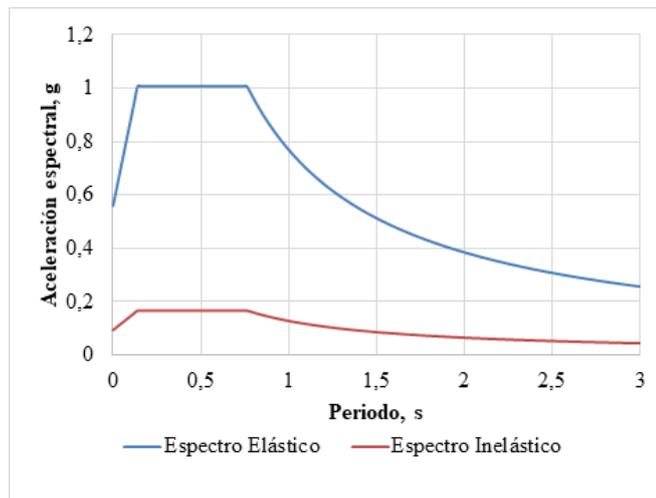
Factores de sitio y parámetros utilizados en el espectro de diseño.

Perfil	Zona Sísmica	Fa	Fd	Fs	Z	r	$\eta$	Ct	$\frac{hn}{m}$	$\alpha$	I	R	$\emptyset P$	$\emptyset Ex$	$\emptyset Ey$
D	6	1.12	1.11	1.40	0.5	1	1.8	0.055	11.9	0.9	1	6	1	1	1

La Figura 3 muestra el espectro de diseño para el sitio de análisis, destacando tanto el espectro elástico (en azul) como el inelástico (en rojo).

**Figura 3.**

Espectro de Diseño para el sitio de análisis.



#### 2.4. ANÁLISIS SÍSMICO DEL EDIFICIO SIN REFORZAR

El análisis sísmico del edificio sin reforzar se llevó a cabo utilizando un programa computacional basado en el método de elementos finitos. Tradicionalmente, este tipo de análisis en la práctica de ingeniería no incluye la rigidez proporcionada por la mampostería, considerando únicamente su peso [20]. Sin embargo, en este estudio se integraron las propiedades de rigidez de la mampostería no enchapada, lo que permitió una evaluación más realista del comportamiento sísmico de la estructura. Las propiedades físico-mecánicas de la mampostería empleadas en el análisis computacional se presentan en la Tabla 2, adaptadas de [21].

**Tabla 2.**

Propiedades de la mampostería de relleno (no enchapada).

Parámetros de la mampostería no enchapada		
$f'm$	8.77	kgf/cm <sup>2</sup>
$E_m$	2347.69	kgf/cm <sup>2</sup>

#### 2.5. PROPUESTA DE REFORZAMIENTO

El esquema de reforzamiento propuesto combina pórticos de acero con diagonales excéntricas y enchapado de mampostería, ambos seleccionados para incrementar significativamente la rigidez lateral en ambas direcciones de la planta, tanto longitudinal como transversal, sin depender de los elementos estructurales existentes. Tanto los pórticos con diagonales excéntricas como el enchapado de mampostería incrementan la capacidad de carga y rigidez del edificio sin aumentar sustancialmente las cargas sobre la estructura. Al concentrar el reforzamiento en los pórticos perimetrales, se logra una intervención mínima que refuerza eficazmente el edificio, manteniendo su estabilidad sin sobrecargar los elementos originales. La Figura 4 muestra la configuración del reforzamiento propuesto, incluyendo la disposición de los pórticos de acero con diagonales excéntricas y el enchapado de mampostería, resaltando su implementación en los pórticos perimetrales.

Dentro del esquema de reforzamiento propuesto, se emplean dos estrategias clave: el uso de diagonales excéntricas en los tramos A2-A3 y B1-C1 y el enchapado de mampostería en B4-C4 y E2-E3 (ver Figura 2), cada una con sus propias ventajas estructurales y arquitectónicas. Las diagonales excéntricas, ubicadas en los pórticos de las fachadas, ofrecen una ventaja arquitectónica significativa, ya que permiten la disposición de puertas y ventanas sin comprometer la continuidad de los elementos estructurales, lo que es esencial para el diseño y la funcionalidad del edificio [22]. Por otro lado, el enchapado de mampostería en los pórticos perimetrales se realiza sin afectar de manera significativa la arquitectura del edificio, ya que no tiene implicaciones relevantes en la disposición de los elementos arquitectónicos como puertas y ventanas. Este sistema consiste en recubrir la mampostería con una malla de acero fijada mediante conectores y revestirla con hormigón de baja resistencia, lo que incrementa la rigidez lateral de la estructura sin interferir con el diseño arquitectónico [14].

La Figura 4 muestra la configuración estructural de la edificación reforzada, destacando los pórticos de acero y sus secciones transversales. El reforzamiento de las paredes de mampostería se lleva a cabo mediante enchapado, utilizando una malla de acero con varillas de 8 mm de diámetro, separadas 10 cm en ambas direcciones ( $f_y=5.000$  kg/cm<sup>2</sup>), y fijadas con conectores de 12 mm

anclados a una profundidad de 10 cm y separación cada 20 cm. La malla se coloca a 5 cm de la pared y se recubre con un hormigón de resistencia  $f_c = 140 \text{ kgf/cm}^2$ , aplicando un espesor de 10 cm, ya que el enchapado se realiza únicamente en una cara de la pared.

La Tabla 3 presenta los parámetros de la mampostería enchapada empleados, obtenidos de la investigación realizada por Maldonado y Pozo [21].

**Tabla 3.**

Propiedades de la mampostería enchapada

Parámetros de la mampostería enchapada		
$f'm$	41.81	$\text{kgf/cm}^2$
$E_m$	9606.95	$\text{kgf/cm}^2$

En los modelos, los pórticos de acero utilizados para el reforzamiento estructural se conectan a los pórticos de hormigón de la estructura original mediante elementos rígidos. El análisis y diseño detallado de estas conexiones no se incluye en el alcance del presente estudio. Sin embargo, es fundamental que estas conexiones sean diseñadas bajo los principios de diseño por capacidad, para asegurar que las conexiones permanezcan elásticas y permitan que los pórticos de acero cumplan su función de refuerzo sin comprometer la integridad estructural. Estudios recientes han explorado diversos métodos para mejorar el desempeño sísmico de pórticos de hormigón armado (HA) mediante el refuerzo con pórticos de acero [23], [24], [25], [26]. Ecemis et al. (2021) [27] investigaron la incorporación de pórticos de acero externos en las esquinas de los edificios, mostrando que estas configuraciones aumentan significativamente tanto la rigidez lateral como la capacidad de carga. De manera similar, Cao et al. (2021) [28] namely, post-tensioned precast bolt-connected steel-plate reinforced concrete frame (PT-PBSPC frame) desarrollaron un marco innovador de acero pretensado con placas atornilladas prefabricadas, lo que mejoró el comportamiento sísmico gracias a un ensamblaje eficiente y elementos pretensados. Maheri y Hadjipour (2003) [29] examinaron conexiones de arriostres a escala real, confirmando que estas conexiones pueden diseñarse exitosamente utilizando las disposiciones actuales de los códigos para estructuras de acero y concreto.

Se analizaron dos alternativas adicionales de reforzamiento para evaluar el impacto de incrementar el número de paredes enchapadas. En el modelo denominado “Refuerzo 2”, se aplicó el enchapado de mampostería en todos los vanos tanto en la dirección X como en la dirección Y, específicamente en los ejes 4 y E, respectivamente. En el “Refuerzo 3”, se enchaparon tres vanos en la dirección X —denominados desde A4 hasta D4— y tres vanos en la

dirección Y del eje E. En ambos casos, no se modificaron las dimensiones de las paredes ni de los enchapados, y se mantuvieron las secciones de los pórticos de acero, con el propósito de aislar el efecto específico del incremento en las paredes enchapadas.

En este estudio, la mampostería de relleno se modeló utilizando elementos tipo shell, lo que permitió capturar de manera más detallada el comportamiento de las paredes [30]. Si bien el modelo de puntal equivalente es un enfoque popular y computacionalmente eficiente para representar las paredes de relleno, evitando la complejidad del modelado detallado de elementos finitos y capturando los efectos generales de resistencia, rigidez y disipación de energía [31], el uso de elementos shell en este caso fue más adecuado para reflejar la interacción entre el relleno y el marco. Aunque el modelo de puntal es útil para análisis no lineales y grandes edificaciones, como lo indican Brodsky (2021) [32](2013) [33], su precisión depende en gran medida de definir correctamente las propiedades del puntal y puede omitir factores importantes como la rigidez flexional de las vigas [30], [34], [35].

La elección entre elementos tipo shell y puntales equivalentes depende del nivel deseado de precisión y eficiencia computacional. Para resultados más precisos, especialmente con aberturas en las paredes, los elementos tipo shell pueden ser preferidos, mientras que los puntales equivalentes ofrecen un enfoque más simple para el análisis general y consideraciones de diseño [36], [37].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

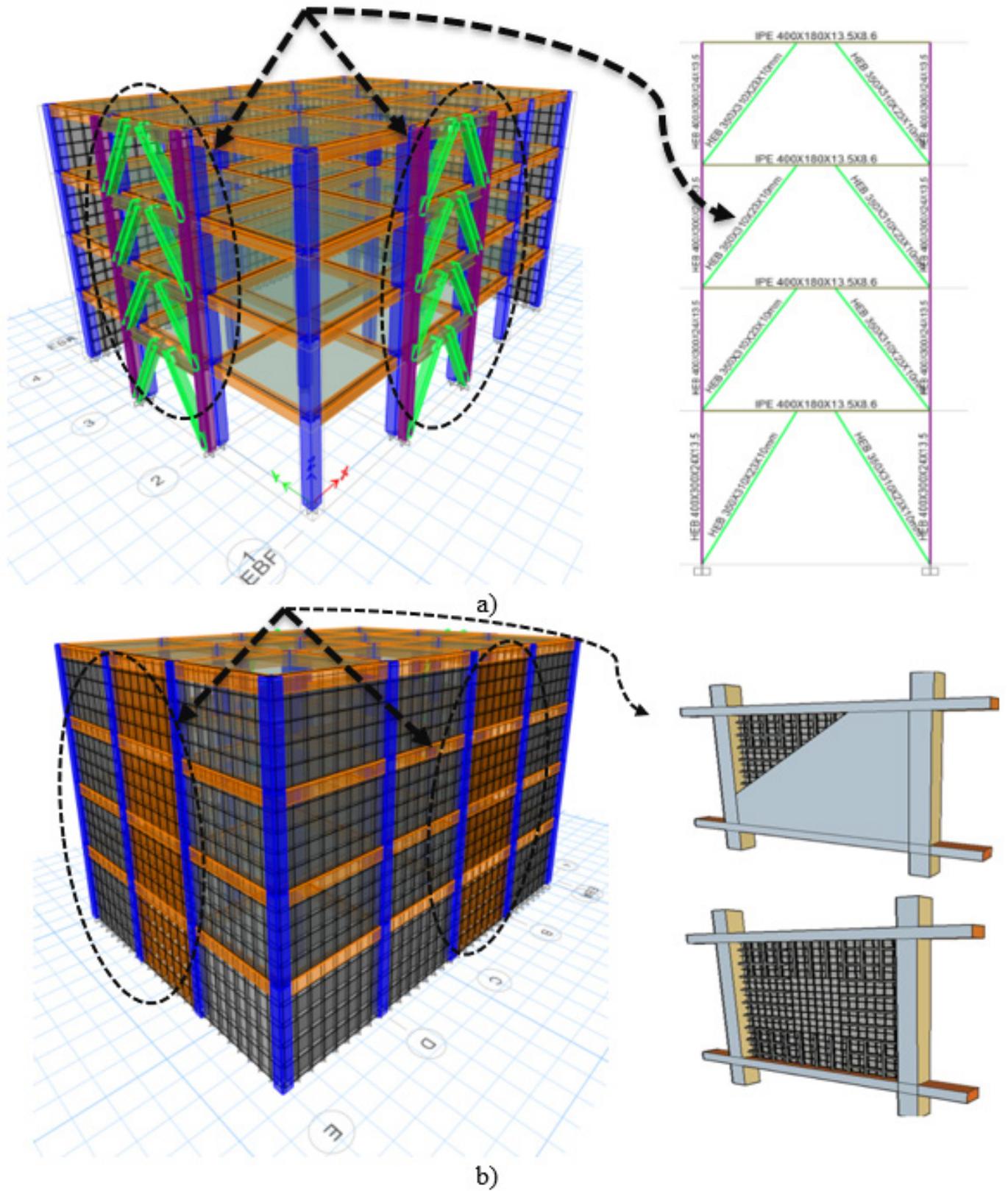
#### 3.1. ANÁLISIS MODAL

En la Tabla 4 y Figuras 5 y 6, se presentan los resultados del análisis modal, que incluyen los períodos de vibración, la participación de masas y las formas modales de cada sistema estructural: el sistema de pórticos sin considerar la mampostería, el sistema de pórticos sin reforzar que sí considera la mampostería, y la edificación reforzada. El análisis revela que el sistema de pórticos sin mampostería, diseñado según las prácticas convencionales, muestra un comportamiento que inicialmente parece adecuado. Sin embargo, al incluir la mampostería en el análisis, se observa un cambio significativo en la matriz de rigidez de la estructura, lo que provoca efectos de torsión que no se contemplan en el diseño original (ver RZ en la Tabla 4).

Los períodos correspondientes a los tres primeros modos de vibración son mayores en los sistemas sin reforzar (con y sin mampostería) en comparación con el sistema reforzado con mampostería enchapada y diagonales excéntricas. Esto evidencia un aumento considerable en la rigidez de la edificación debido al reforzamiento aplicado,

**Figura 4.**

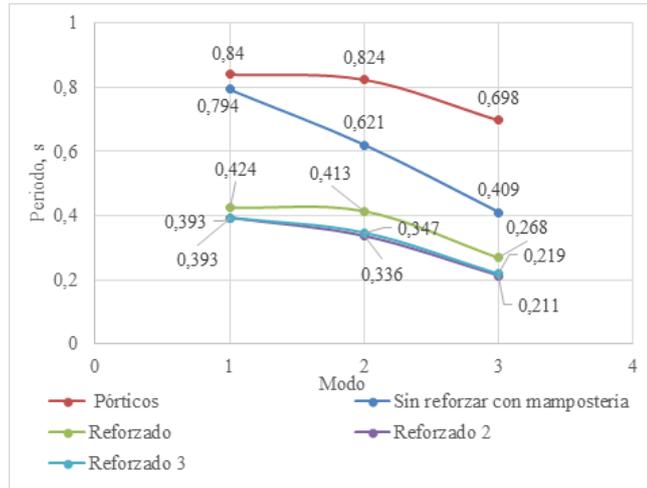
Edificación reforzada: a) modelo tridimensional mostrando las diagonales excéntricas; b) modelo tridimensional mostrando el enchapado de mampostería.



reduciendo la flexibilidad estructural y mejorando la capacidad de respuesta ante cargas sísmicas.

**Figura 5.**

Análisis modal, periodos de la edificación de los diferentes casos.



**3.2. ANÁLISIS DE DERIVAS**

En esta sección se presentan los resultados de las derivas obtenidas mediante el análisis estático equivalente lineal (sismo en X y sismo en Y o SX y SY, respectivamente) y el análisis dinámico lineal (espectral en X y espectral en Y). Como se muestra en la Figura 7, al aplicar el reforzamiento al sistema estructural mediante enchapado de mampostería y diagonales excéntricas, se observa una notable reducción en los efectos de torsión, que son comunes en edificaciones abiertas o esquineras. Además, la participación de la dirección ortogonal en la respuesta estructural se vuelve insignificante, lo que indica una mejora en el comportamiento estructural. Los resultados muestran que el reforzamiento propuesto mejora significativamente el comportamiento estructural, reduciendo las derivas y los efectos de torsión, como se ilustra en la Figura 7.

**Tabla 4.**

Periodos de vibración y participación modal correspondiente a los tres primeros modos.

Caso de estudio	Modo	Periodo	UX	UY	RZ
		segundos			
<b>Pórticos</b>	1	0.840	0%	<b>100%</b>	0%
	2	0.824	<b>100%</b>	0%	0%
	3	0.698	0%	0%	100%
<b>Sin reforzar con mampostería</b>	1	0.794	25%	<b>54%</b>	<b>21%</b>
	2	0.621	<b>63%</b>	36%	1%
	3	0.409	13%	10%	77%
<b>Reforzado</b>	1	0.424	0%	<b>100%</b>	0%
	2	0.413	<b>100%</b>	0%	0%
	3	0.268	0%	0%	100%
<b>Reforzado 2</b>	1	0.393	17%	<b>69%</b>	<b>14%</b>
	2	0.336	<b>72%</b>	25%	<b>3%</b>
	3	0.211	10%	6%	84%
<b>Reforzado 3</b>	1	0.393	26%	<b>62%</b>	<b>12%</b>
	2	0.347	<b>68%</b>	31%	<b>1%</b>
	3	0.219	6%	7%	87%

La Tabla 5 muestra que las derivas máximas de las estructuras cumplen con el límite del 2% establecido por la NEC 15 en la mayoría de los escenarios analizados. El sistema estructural de pórticos sin considerar la mampostería, así como los sistemas reforzados, se mantienen por debajo de este umbral en ambas direcciones. Sin embargo, en el sistema sin reforzar con mampostería incluida en el análisis, la deriva en la dirección Y ligeramente excede el límite con un valor de 2.05%. Por otra parte, un estudio realizado por Vielma et al. determinó que la incursión inelástica global en paredes de mampostería confinada en edificios formales ocurre con derivas de aproximadamente 0.4% a 0.8%, mientras que en edificios informales estas derivas se sitúan entre 0.25% y 0.5% [20]. Este hallazgo destaca que, en edificaciones abiertas, un evento sísmico puede provocar cambios abruptos en la matriz de rigidez y en el comportamiento estructural, generando efectos de torsión que pueden conducir al colapso. La propuesta de reforzamiento presentada en este estudio no solo incrementa la rigidez lateral de la edificación y reduce las derivas, sino que también previene la aparición de efectos torsionales, manteniendo las derivas dentro del rango recomendable para evitar el daño de las paredes de mampostería.

### 3.3. CHEQUEO DE IRREGULARIDAD TORSIONAL

La Tabla 6 muestra la relación entre la deriva máxima y la deriva promedio para los distintos casos estudiados. Según los criterios normativos, si esta relación supera el valor de 1.2, se considera que la estructura presenta una irregularidad torsional.

A partir de los resultados presentados se observa que, además del caso sin reforzar con mampostería, los casos de reforzamiento 2 y 3 también exceden este valor límite, indicando la presencia de irregularidades torsionales. Por lo tanto, estos esquemas de reforzamiento no son viables para su aplicación en la edificación analizada. En contraste, el caso de reforzamiento propuesto cumple satisfactoriamente con esta relación, manteniéndose dentro de los límites aceptables y garantizando un comportamiento estructural adecuado.

### 3.4. RELACIÓN DEMANDA/CAPACIDAD A FLEXO-COMPRESIÓN

En la Figura 8, se presentan las gráficas de la relación demanda/capacidad a flexo-compresión para los diferentes casos de estudio: sistemas de pórticos sin reforzar y reforzados. Se puede observar que, al considerar la mampostería en el análisis estructural, esta absorbe una parte significativa de los esfuerzos que originalmente recaían sobre las columnas y vigas, especialmente en los elementos que están directamente conectados a la mampostería. Esto reduce significativamente la demanda de esfuerzos en estos elementos, lo que evidencia un cambio en la rigidez de la estructura. Sin embargo, este cambio también puede ocasionar daños importantes en edificaciones de este tipo debido a la baja resistencia de las paredes de mampostería frente a estas solicitaciones. Por otro lado, en el caso de la edificación reforzada, se observa un aumento en la rigidez estructural, lo que incrementa la capacidad de la edificación para resistir cargas sísmicas, mejorando así su comportamiento global y reduciendo el riesgo de fallos estructurales.

En el sistema sin reforzar, pero considerando la mampostería (Figura 8b), se observa que la mampostería absorbe una parte significativa de los esfuerzos, reduciendo la demanda en los elementos estructurales a valores de hasta 0.75. Sin embargo, la baja resistencia de las paredes de mampostería ante solicitaciones de fuerza puede generar daños importantes en este tipo de edificaciones.

En contraste, en la edificación reforzada (Figura 8c), la rigidez se incrementa significativamente, reduciendo la relación demanda/capacidad en los elementos estructurales a valores que oscilan entre 0.25 y 0.55, lo que mejora notablemente el comportamiento global de la estructura. Finalmente, el sistema de marcos con arriostramiento excéntrico (Figura 8d) muestra un excelente desempeño, con la relación demanda/capacidad controlada en todos los elementos, alcanzando valores mínimos de hasta 0.10 y máximos de 0.50. Esto indica que la capacidad de la estructura para resistir cargas sísmicas se ha optimizado, reduciendo el riesgo de fallos estructurales.

### 3.4. REVISIÓN DEL ACERO REQUERIDO EN LAS DIFERENTES CONDICIONES DE LA EDIFICACIÓN

Se seleccionará un eje en cada dirección en X y en Y para mostrar el acero requerido en cada escenario de modelación. En la Figura 9 se muestra que, en el sistema de pórticos sin considerar la mampostería, la demanda de

Tabla 5.

Resumen de derivas máximas

Sentido	Pórtico		Sin reforzar		Reforzado		Reforzado 2		Reforzado 3	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
<b>Deriva máx.</b>	1.89%	1.99%	1.57%	2.05%	0.50%	0.52%	0.40%	0.50%	0.42%	0.49%

acero es mayor debido a la menor rigidez del sistema, con valores de acero requerido que oscilan entre  $4.16 \text{ cm}^2$  y  $10.10 \text{ cm}^2$ . Al incluir la mampostería en el análisis estructural (Figura 9b), la demanda de acero disminuye, con valores que varían entre  $3.52 \text{ cm}^2$  y  $9.63 \text{ cm}^2$ , ya que la mampostería absorbe parte de los esfuerzos estructurales. En el sistema reforzado (Figura 9c), se observa una mayor optimización en la demanda de acero, con áreas requeridas que oscilan entre  $3.52 \text{ cm}^2$  y  $8.71 \text{ cm}^2$ , lo que demuestra una mejora significativa en la capacidad estructural y una distribución más eficiente de las cargas gracias al reforzamiento aplicado. Estos resultados destacan la eficacia del reforzamiento propuesto al reducir la cantidad de acero necesario, sin comprometer la seguridad estructural del edificio.

### 3.5. DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS DE CORTE EN LOS DIFERENTES ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEBIDO A SISMOS X E Y.

En la Figura 10, se observa los resultados de la distribución de la fuerza cortante actuante en cada caso y para cada dirección. En el primer caso, se analizó el edificio con pórticos de hormigón armado, y las columnas absorbieron el 100% del cortante basal. En el segundo caso, se analizó la misma edificación considerando la mampostería, que absorbió el 20% del cortante basal en cada dirección. En el tercer caso, se realizó el análisis con la edificación reforzada, donde las mamposterías enchapadas en conjunto con las diagonales excéntricas absorbieron más del 75% del cortante basal en cada dirección (en dirección X = 78,44% y en Y = 76,44%).

## 4. CONCLUSIONES

La distribución irregular de los muros de mampostería en edificaciones esquineras provoca una inadecuada distribución de rigideces, generando problemas significativos de torsión que pueden llevar al colapso. La incorporación de la mampostería en el análisis estructural modifica significativamente la rigidez de los edificios, ya que absorbe una parte considerable de los esfuerzos sísmicos que de otro modo recaerían en columnas y vigas. Por lo tanto, es fundamental incluir la mampostería en los cálculos estructurales para obtener resultados más realistas y precisos del comportamiento durante un sismo.

La implementación del mecanismo de refuerzo mediante enchapado de mampostería y diagonales excéntricas logra una distribución uniforme de rigideces, eliminando los efectos de torsión y reduciendo la distorsión de piso. Esto mejora significativamente la seguridad y estabilidad de la edificación, evitando daños en las paredes de mampostería existentes y optimizando la demanda de acero, lo que representa un uso más eficiente de

los recursos materiales sin comprometer la integridad estructural.

El análisis modal evidenció que el reforzamiento disminuyó los períodos de vibración de la estructura, reflejando un aumento significativo en la rigidez global. La reducción en los períodos de los tres primeros modos de vibración y las formas modales indican una mejora en la capacidad para controlar acciones sísmicas y un comportamiento dinámico más favorable.

En los edificios reforzados, las mamposterías enchapadas y las diagonales excéntricas absorbieron más del 75% del cortante basal sísmico en ambas direcciones, aliviando significativamente la carga en las columnas principales. Esta redistribución eficiente de las cargas sísmicas reduce el riesgo de fallos estructurales en las columnas y mejora el desempeño general del edificio.

Las derivas máximas obtenidas en los distintos escenarios de análisis cumplieron con los límites establecidos por la normativa ecuatoriana NEC 15, es decir, valores menores al 2%. Además, la implementación del reforzamiento permitió mantener las derivas dentro de los rangos recomendados para evitar el daño de las paredes de mampostería, confirmando la efectividad de la propuesta para mejorar la resiliencia sísmica de las edificaciones.

Las alternativas adicionales de reforzamiento (refuerzo 2 y refuerzo 3), que incrementaron el número de muros enchapados sin modificar las dimensiones de las paredes ni las secciones de los pórticos de acero, no fueron viables debido a problemas de irregularidad torsional, superando el límite normativo (relación deriva máxima/ deriva promedio superior a 1.2). Esto resalta la importancia de una adecuada distribución de rigideces al diseñar esquemas de reforzamiento, evitando incrementos indiscriminados que puedan generar efectos negativos en el comportamiento sísmico.

Capturar los máximos y mínimos de la respuesta estructural mediante modelos simplificados de análisis estático lineal puede generar una incertidumbre considerable, especialmente al modelar elementos estructurales clave. Para evaluar esta incertidumbre, se realizó un análisis comparativo de las derivas utilizando dos configuraciones adicionales de modelación. En el primer modelo, que considera únicamente los elementos de hormigón armado enchapado y los pórticos de acero, sin incluir las mamposterías, se obtuvieron derivas máximas de 0.8% en la dirección X y 0.9% en la dirección Y, cumpliendo con el límite del 2% establecido por la NEC. En el segundo modelo, que excluye el enchapado pero incluye las mamposterías y los pórticos de acero, las derivas máximas fueron de 0.7% en la dirección X y 0.85% en la dirección Y, por debajo del límite del 1% recomendado para mamposterías más frágiles según la normativa.

Se recomienda que futuros estudios incluyan análisis no lineales y pruebas experimentales para validar y perfeccionar los resultados obtenidos, considerando también

la influencia de las aberturas en las paredes de mampostería. Esto permitirá obtener una representación más precisa del comportamiento estructural y evaluar el impacto de emplear dos sistemas estructurales en la respuesta inelástica de la edificación, previniendo posibles problemas durante eventos sísmicos severos.

En este estudio, se utilizaron elementos tipo shell para modelar la mampostería de relleno, lo que permitió una representación más detallada en comparación con el modelo de puntal equivalente, que, aunque eficiente, puede ignorar aspectos clave como la rigidez flexional de las vigas. Aunque no forma parte del alcance de este trabajo y no se presentan detalles específicos, también se desarrollaron modelos utilizando el método del puntal equivalente según la metodología de FEMA 356 [38]. Los análisis preliminares indicaron que los resultados en términos de derivas pueden incrementar hasta en un 50%. Se recomienda realizar un estudio específico para abordar la incertidumbre en la modelación de la mampostería, evaluando el impacto de ambos enfoques en los resultados estructurales de arquetipos similares, y proponiendo una metodología que equilibre la precisión y la eficiencia computacional.

Los hallazgos de este estudio proporcionan una base sólida para mejorar las prácticas de diseño y reforzamiento de edificios esquineros en zonas sísmicas de Ecuador, como Portoviejo. La estrategia de reforzamiento propuesta se presenta como una solución viable y eficaz para incrementar la resistencia y rigidez lateral de las estructuras, contribuyendo a la seguridad y resiliencia de las comunidades locales frente a eventos sísmicos.

## REFERENCIAS

- [1] F. Cunalata y P. Caiza, «Estado del arte de estudios de vulnerabilidad sísmica en Ecuador», vol. 50, n.º 1. *Revista Politécnica*, 2022, doi: <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.06>.
- [2] P. Quinde y E. Reinoso, «Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca», *Ingeniería sísmica*, vol. 94, 2016, [En línea]. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-092X2016000100001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2016000100001)
- [3] A. Zambrano, C. Frau, y J. Vielma, «Análisis no lineal de sismos destructivos. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016», *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 28, n.º 1, pp. 17-34, 2023, doi: <https://doi.org/10.24133/riie.v28i1.3107>.
- [4] R. Aguiar, A. Jara, y P. Darío, «Edificios abiertos con y sin aisladores de base», *Ciencia*, vol. 12, n.º 1, pp. 1-25, 2009.
- [5] V. Romoaldo, «Nueva filosofía de diseño por torsión sísmica en estructuras de mampostería», Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/348>
- [6] C. Cortés, «Vulnerabilidad sísmica de edificios en esquina durante el temblor del 19 de septiembre de 2017», Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2020. [En línea]. Disponible en: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/4088](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4088)
- [7] A. Tena-Colunga, «Enseñanzas principales durante sismos recientes», presentado en Seminario Anual Riesgo Terremoto y Huracán, Hannover, 2004, p. 37. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/259487430\\_Enseñanzas\\_principales\\_durante\\_sismos\\_recientes](https://www.researchgate.net/publication/259487430_Enseñanzas_principales_durante_sismos_recientes)
- [8] R. Aguiar y Y. Mieles, «Análisis de los edificios que colapsaron en Portoviejo durante el terremoto del 16 de abril de 2016», *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 21, n.º 3, pp. 257-282, 2018, doi: <https://doi.org/10.24133/riie.v21i3.601>.
- [9] G. Menéndez, J. García, y A. Reyna, «Vulnerabilidad sísmica en edificaciones de la ciudad de Portoviejo: Reflexiones del 16-A», *InGenio Journal*, vol. 6, n.º 1, pp. 73-86, 2023, doi: <https://doi.org/10.18779/ingenio.v6i1.565>.
- [10] B. Cagua, J. Pilatasig, R. Aguiar, y C. Morales, «Non-linear Behavior of Steel Frames with Concentric and Eccentric Bracing», en *Applied Technologies*, M. Botto-Tobar, M. Zambrano Vizueté, S. Montes León, P. Torres-Carrión, y B. Durakovic, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 32-45.
- [11] J. García y T. Hernández, «Respuesta inelástica de marcos dúctiles con contraviento excéntrico», *Ingeniería sísmica*, vol. 100, pp. 51-70, 2019, doi: <https://smis.mx/index.php/RIS/article/view/RIS-100-3>.
- [12] E. Márquez, W. lobo, y J. Vielma, «Estructuras de acero comportamiento de edificios de acero con diagonales concéntricas y excéntricas», presentado en X Convesis, Cumaná, 2015, p. 10. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/286919885\\_ES-TRUCTURAS\\_DE\\_ACERO\\_COMPORTEAMIENTO\\_DE\\_EDIFICIOS\\_DE\\_ACERO\\_CON\\_DIAGONALES\\_CONCENTRICAS\\_Y\\_EXCENTRICAS](https://www.researchgate.net/publication/286919885_ES-TRUCTURAS_DE_ACERO_COMPORTEAMIENTO_DE_EDIFICIOS_DE_ACERO_CON_DIAGONALES_CONCENTRICAS_Y_EXCENTRICAS)
- [13] C. Castillo, J. Castillo, P. Placencia, L. Hernández, M. Herrera, y G. Christian, «Reforzamiento estructural en viviendas adosadas mediante recubrimiento de mampostería con malla electrosoldada y mortero», *Gaceta Técnica*, vol. 23, n.º 2, pp. 53-69, 2022, doi: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica232.5>.
- [14] M. Herrera, «Análisis por desempeño de estructuras de hormigón armado con mampostería reforzada (enchape) para edificaciones de mediana altura», Tesis de maestría, Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito,

- Ecuador, 2023.
- [15] V. Singhal y D. C. Rai, «Behavior of Confined Masonry Walls with Openings under In-Plane and Out-of-Plane Loads», *Earthquake Spectra*, vol. 34, n.º 2, pp. 817-841, may 2018, doi: 10.1193/061416EQS097M.
- [16] MIDUVI, *NEC-SE-CG: Norma Ecuatoriana de la Construcción – Cargas (no sísmicas)*. Quito, Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014. Accedido: 5 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- [17] MIDUVI, *NEC-SE-DS: Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Diseño Sismo Resistente*. Quito, Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014. Accedido: 5 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- [18] MIDUVI, *NEC-SE-HM: Norma Ecuatoriana de la Construcción – Estructuras de Hormigón Armado*. Quito, Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014. Accedido: 5 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- [19] «Estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Portoviejo y sus cabeceras parroquiales rurales», 2017.
- [20] J. Vielma, R. Aguiar, C. Frau, y A. Zambrano, «Irregularity of the Distribution of Masonry Infill Panels and Its Effect on the Seismic Collapse of Reinforced Concrete Buildings», *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 18, 2021, doi: 10.3390/app11188691.
- [21] M. Maldonado y A. Pozo, «Estudio comparativo de las propiedades Físico-Mecánicas entre 4 tipos de mamposterías reforzadas con la técnica del enchape», Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2019.
- [22] K. Aguilar, «Estudio comparativo de edificios de acero de gran altura con diagonales excéntricas, concéntricas y diagonales con amortiguadores en la ciudad de Quito», Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://catalogobiblioteca.puce.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=70174>
- [23] P. Javadi, M. Askari, S. Vahedi, A. GhafourianHesami, y A. Tizchang, «Retrofit of RC buildings using vertical shear links and hybrid connections», *Structures*, vol. 48, pp. 1788-1807, feb. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.01.015.
- [24] H.-J. Lee, H.-B. Lee, H.-G. Park, y J.-K. Lee, «Cyclic Loading Test for Two-Story RC Moment Frames Retrofitted with Internal Steel Frames», *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, n.º 2, p. 04020333, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002918.
- [25] X.-Y. Cao, D. Shen, D.-C. Feng, C.-L. Wang, Z. Qu, y G. Wu, «Seismic retrofitting of existing frame buildings through externally attached sub-structures: State of the art review and future perspectives», *Journal of Building Engineering*, vol. 57, p. 104904, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104904.
- [26] X.-Y. Cao, D.-C. Feng, G. Wu, y Z. Wang, «Experimental and theoretical investigations of the existing reinforced concrete frames retrofitted with the novel external SC-PBSPC BRBF sub-structures», *Engineering Structures*, vol. 256, p. 113982, abr. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113982.
- [27] A. S. Ecemis, H. H. Korkmaz, y Y. Dere, «Seismic performance improvement of RC buildings with external steel frames», *1*, vol. 27, n.º 4, Art. n.º 4, abr. 2021.
- [28] X.-Y. Cao, G. Wu, y J.-W. W. Ju, «Seismic performance improvement of existing RCFs using external PT-PBSPC frame sub-structures: Experimental verification and numerical investigation», *Journal of Building Engineering*, vol. 46, p. 103649, abr. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103649.
- [29] M. R. Maheri y A. Hadjipour, «Experimental investigation and design of steel brace connection to RC frame», *Engineering Structures*, vol. 25, n.º 13, pp. 1707-1714, nov. 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(03)00162-7.
- [30] G. Alva y G. Montandon, «Structural models for analysis of reinforced concrete frame buildings with masonry infills», *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 12, 2019.
- [31] E. Yu, M. Kim, y D. Jung, «A Comparison Study of Equivalent Strut Models for Seismic Performance Evaluation of Masonry-Infilled Frame», *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, vol. 18, n.º 2, pp. 79-87, 2014, doi: 10.5000/EESK.2014.18.2.079.
- [32] A. Brodsky, «A micro-macro modelling methodology for the analysis of infilled frames», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, n.º 5, pp. 2161-2184, mar. 2021, doi: 10.1007/s10518-021-01045-9.
- [33] A. Adukadukam y A. K. Sengupta, «Equivalent Strut Method for the Modelling of Masonry Infill Walls in the Nonlinear Static Analysis of Buildings», *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 94, n.º 2, pp. 99-108, may 2013, doi: 10.1007/s40030-013-0042-y.
- [34] K. M. Kareem y E. M. Güneysi, «Effect of Masonry Infill Wall Configuration and Modelling Approach on the Behaviour of RC Frame Structures», *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, n.º 5, pp. 4309-4324, may 2019, doi: 10.1007/s13369-018-3389-6.
- [35] J. Srechai, S. Leelataviwat, W. Wararuksajja, y S. Limkattanyu, «Multi-strut and empirical formula-based macro modeling for masonry infilled RC frames», *Engineering Structures*, vol. 266, p. 114559, sep. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114559.
- [36] S. Sattar y A. B. Liel, «Seismic Performance of Non-ductile Reinforced Concrete Frames with Masonry

Infill Walls–II: Collapse Assessment», *Earthquake Spectra*, vol. 32, n.º 2, pp. 819-842, may 2016, doi: 10.1193/091514eqs141m.

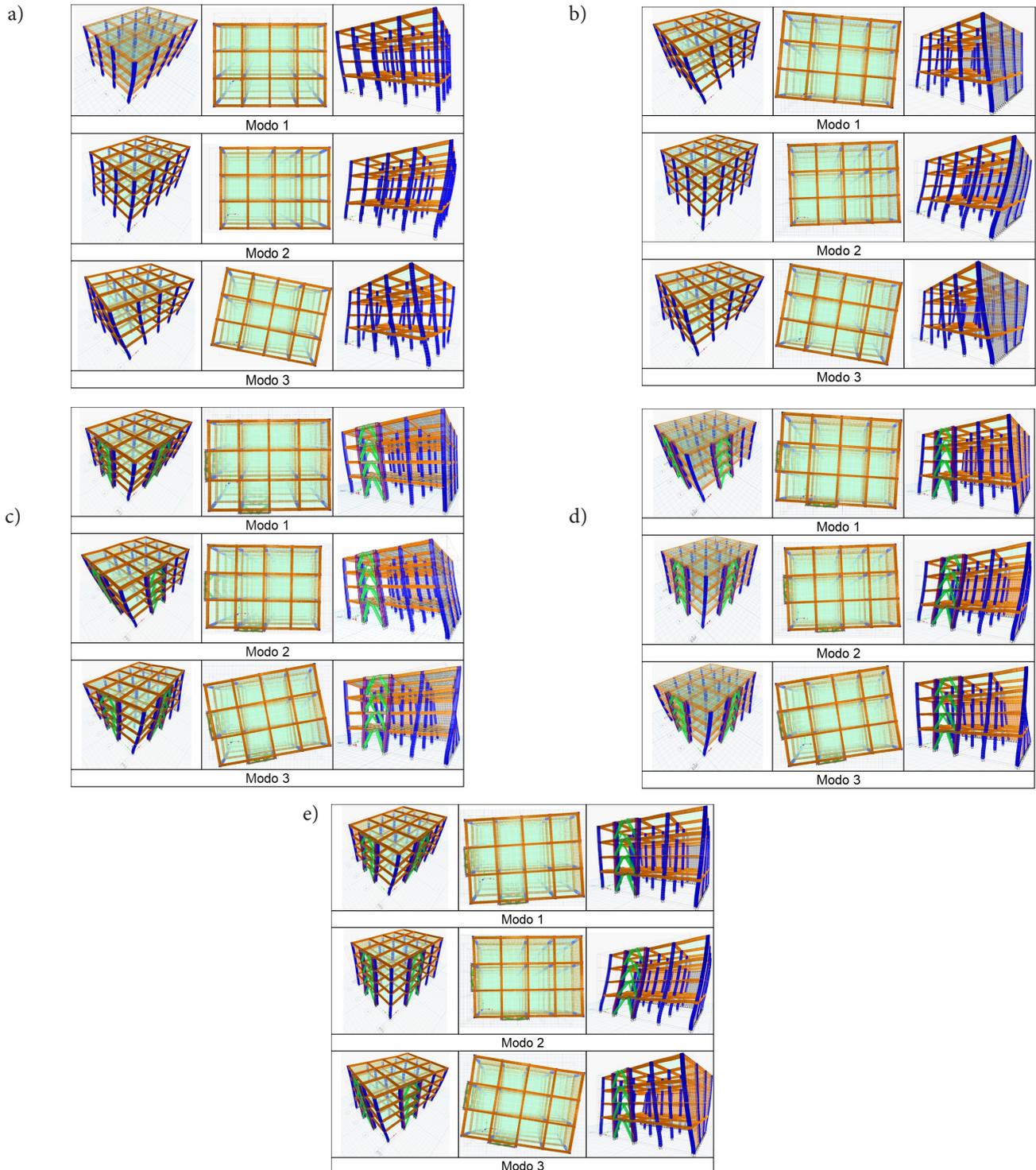
- [37] M. Sukrawa, «Earthquake Response of RC Infilled Frame with Wall Openings in Low-rise Hotel Buildings», *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 933-939, ene. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.118.

- [38] F. E. FEMA 356, «Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings», *Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA*, 2000.

**ANEXOS A**

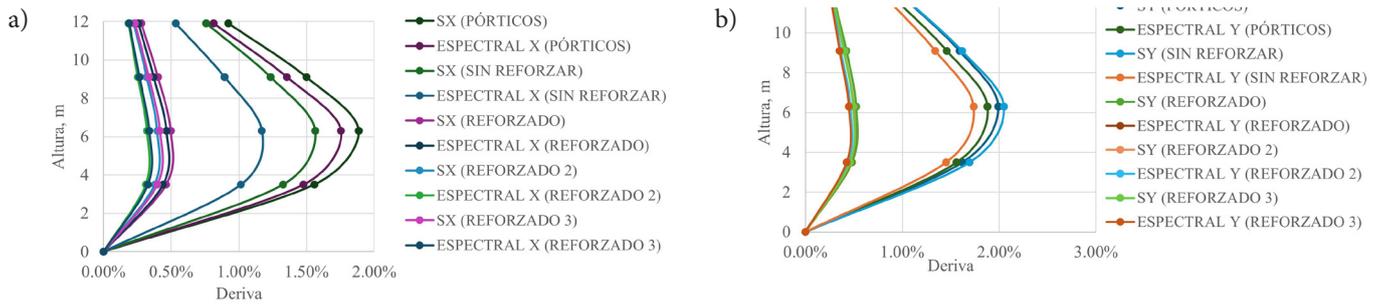
**Figura 6.**

Deformaciones del análisis modal: a) Sistema de pórticos sin mampostería; b) Pórtico con presencia de mampostería de relleno; c) Sistema reforzado con diagonales excéntricas y mampostería enchapada en un vano en X y en Y; d) Sistema reforzado 2; e) Sistema reforzado 3.



**Figura 7.**

Derivas de los diferentes casos de estudios (sistema de pórticos sin mampostería, sistema sin reforzar tomando en cuenta la mampostería y sistemas reforzados: a) Derivas de Sismo en X, Espectral en X; b) Derivas de sismo en Y, espectral en Y.



**Figura 8.**

Relación demanda/capacidad: a) sistema de pórticos sin considerar la mampostería; b) sistema sin reforzar donde se toma en cuenta la mampostería; c) edificación reforzada; d) sistema de marcos con arriostramiento excéntrico.

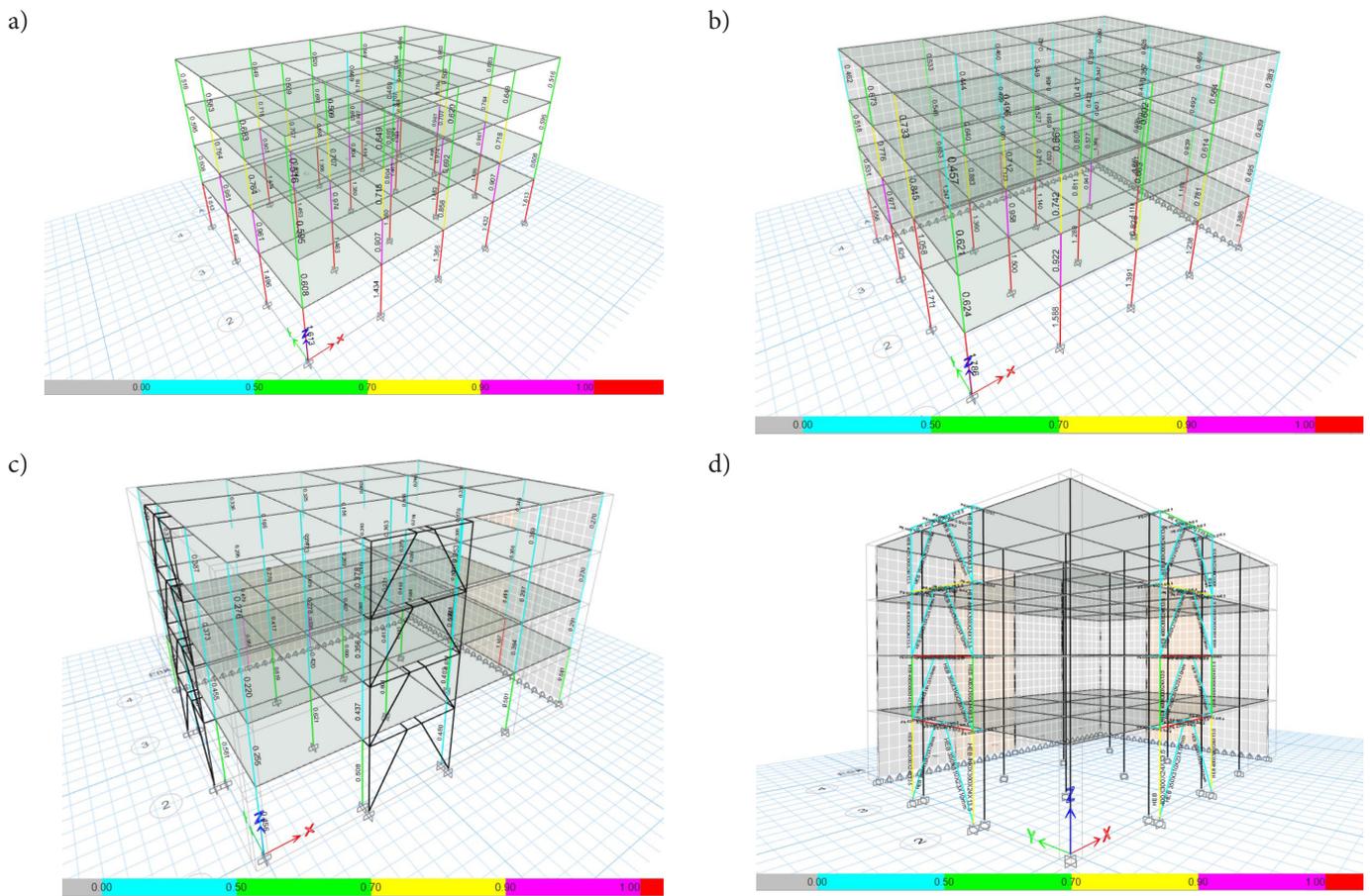
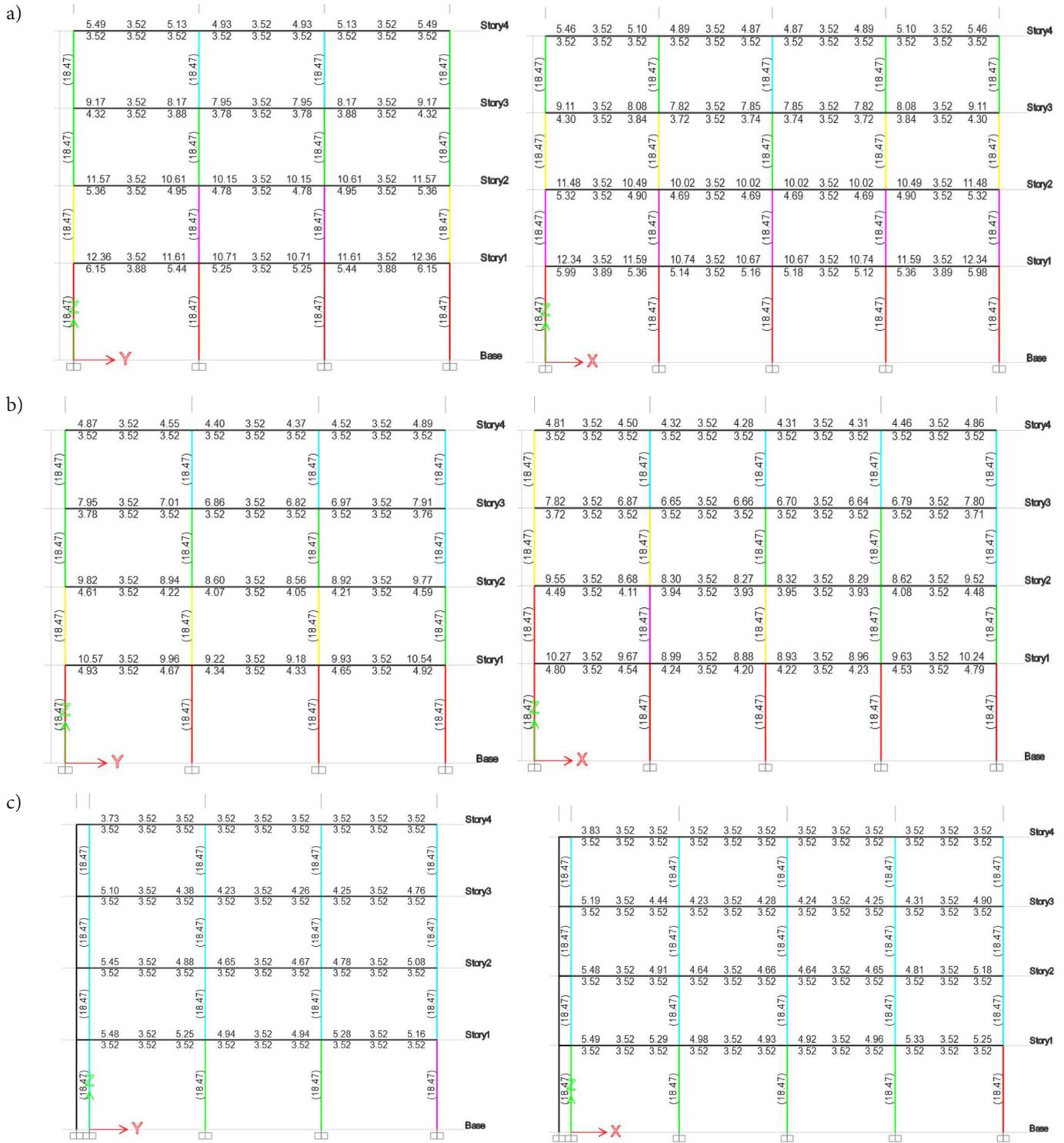


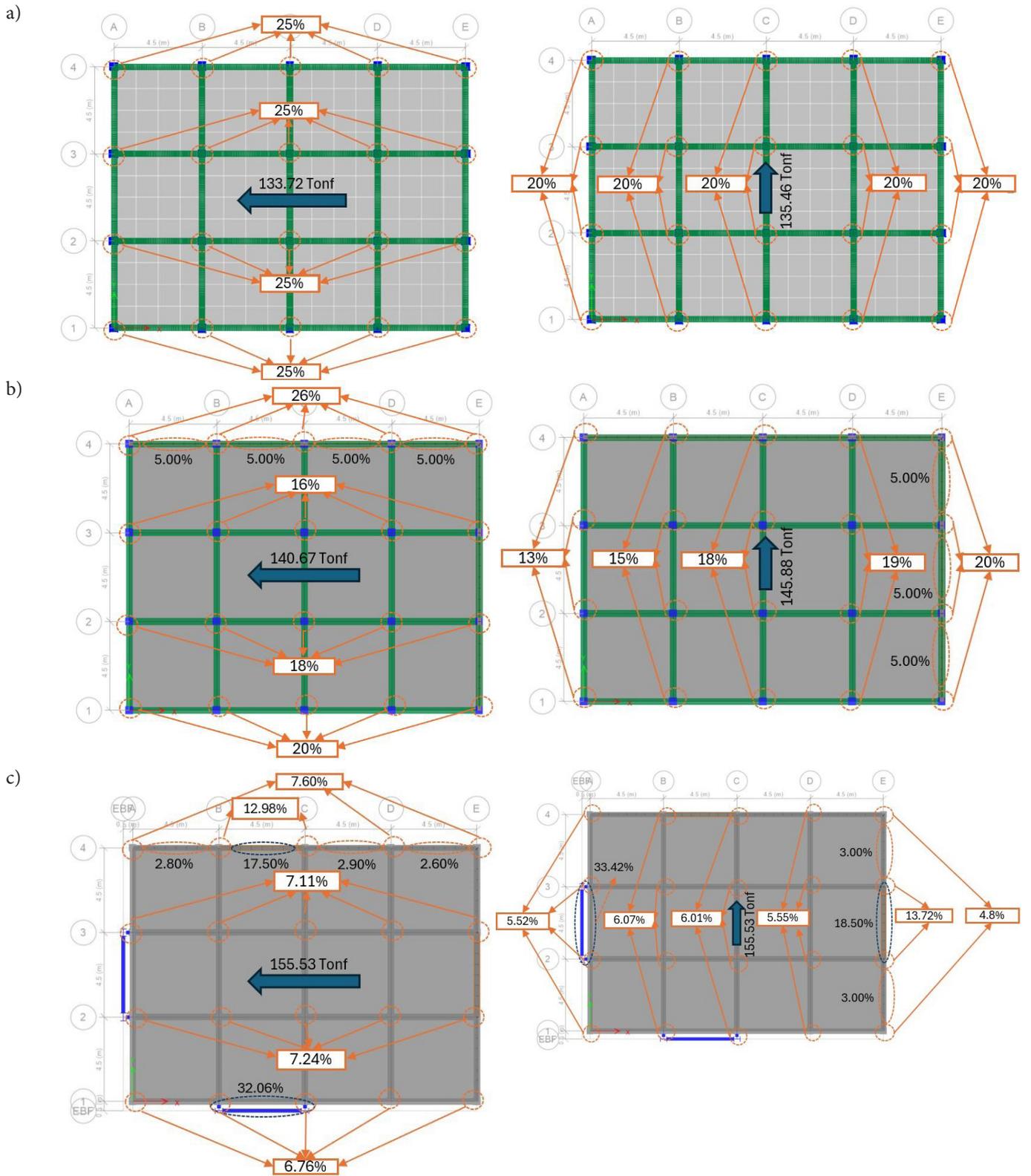
Figura 9.

Área de acero requerido en columnas y vigas en el eje C y eje 2: a) Sistema de pórticos sin tomar en cuenta la mampostería; b) Sistema de pórticos considerando la mampostería; c) Sistema de pórticos reforzado.



**Figura 10.**

Porcentaje de fuerzas de cortante que absorben los elementos estructurales: a) Caso 1: Análisis sin considerar la mampostería; b) Caso 2: Análisis considerando la mampostería; c) Caso 3: Análisis aplicando la propuesta de reforzamiento a la edificación.



**ANEXOS B****Tabla 6.**

Relación deriva máxima/deriva promedio considerando 5% de excentricidad accidental

Caso	Nivel 4		Nivel 3		Nivel 2		Nivel 1		Irregularidad
	x	y	x	y	x	y	x	y	
Pórticos	1,071	1,121	1,071	1,122	1,071	1,122	1,071	1,123	Ninguna
Sin reforzar con mampostería	1,372	1,479	1,365	1,477	1,358	1,47	1,323	1,435	Extrema
Reforzado	1,127	1,119	1,082	1,1	1,081	1,101	1,077	1,096	Ninguna
Reforzado 2	1,394	1,381	1,285	1,33	1,275	1,325	1,252	1,301	Irregular
Reforzado 3	1,308	1,384	1,223	1,335	1,216	1,334	1,199	1,314	Irregular



# REVISTA INGENIO

## Analysis of the Biodegradability Index of Organic Matter in the Water of the Machangara River in Quito City

### Análisis del Índice de Biodegradabilidad de la Materia Orgánica en el Agua del Río Machángara en la Ciudad de Quito

Suly Margoth Rodríguez Ayala |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador

Montserrat Rodríguez Ayala |  Universidad de Madrid - UAM, Madrid - España

Silvia Elizabeth Garcia Gonzalez |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador

Darwin Rodolfo Caina Aysabucha |  Universidad Central del Ecuador - UCE, Quito - Ecuador

Recibido: 20/9/2024

Recibido tras revisión: 25/10/2024

Aceptado: 14/11/2024

Publicado: 03/01/2025

#### KEY WORDS

Biodegradability, contaminants, treatment, parameters, Machángara river.

#### PALABRAS CLAVE

Biodegradabilidad, contaminantes, tratamiento, parámetros, río Machángara

#### ABSTRACT

The evaluation of the water quality in rivers is essential to identify the impact of human activities and establish mitigation strategies. The aim of this project is to analyze the biodegradability index of organic matter in the water of the Machángara river in Quito city of Ecuador. It flows through some places of Quito such as “Las Cuadras”, “El Recreo”, “La Recoleta”, and “Nayon”. Through sampling in the aforementioned sectors, the parameters necessary for the calculation of biochemical (BOD), and chemical (COD) oxygen demand were analyzed, along with other physicochemical parameters such as turbidity and watercolor. In addition, a survey was conducted in the study areas in March 2023. The results showed a significant variability in the level of contamination among the sectors analyzed. A higher level of contamination was found in the areas of La Recoleta and El Recreo compared to Las Cuadras, and Nayon, which is attributed to direct discharges of pollutants from illegal pipes connected to both industries and households. The biodegradability index obtained suggests the need to implement chemical, and biological treatments for the efficient removal of organic and inorganic pollutants present in the river. The physicochemical analysis showed that the turbidity, and color of the water also correlated with the high levels of pollution observed, especially in the most affected sectors. The information gathered through interviews showed that the local population suffers directly from the negative effects of this contamination, manifesting symptoms such as headaches, nausea, vomiting, fatigue, lack of concentration, and depression, especially in children, and older adults. In conclusion, the results of this study highlight the need for immediate corrective measures, such as chemical, and biological treatments, to mitigate the environmental, and health impacts of the Machángara River and improve the quality of life of the affected population.

#### RESUMEN

La evaluación de la calidad del agua en ríos es esencial para identificar el impacto de las actividades humanas y establecer estrategias de mitigación. El objetivo de este proyecto fue analizar el índice de biodegradabilidad de la materia orgánica en el agua del río Machángara en la ciudad de Quito en Ecuador. Este río atraviesa algunos lugares de Quito tales como: Las Cuadras, El Recreo, La Recoleta y Nayón. Mediante un muestreo en los sectores mencionados, se analizaron los parámetros necesarios para el cálculo de la demanda bioquímica (DBO5) y química (DQO) de oxígeno, junto con otros parámetros fisicoquímicos como la turbidez y el color del agua. Además, se realizó un levantamiento de información en marzo de 2023 en las zonas de estudio. Los resultados mostraron una variabilidad significativa en los niveles de contaminación entre los sectores analizados. Se identificó un mayor nivel de contaminación en las zonas de La Recoleta y El Recreo en comparación con Las Cuadras y Nayón, lo cual se atribuye a descargas directas de contaminantes provenientes de tuberías ilegales conectadas tanto a industrias como a domicilios. El índice de biodegradabilidad obtenido sugiere la necesidad de implementar tratamientos químicos y biológicos para la remoción eficiente de los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el río. El análisis fisicoquímico reveló que la turbidez y el color del agua también se correlacionan con los altos niveles de contaminación observados, particularmente en los sectores más afectados. El levantamiento de información a través de encuestas demostró que la población local sufre de manera directa los efectos negativos de esta contaminación, manifestando síntomas como cefalea, náuseas, vómitos, fatiga, falta de concentración y depresión, especialmente en niños y adultos mayores. En conclusión, los resultados de este estudio resaltan la necesidad de aplicar medidas correctivas inmediatas, como tratamientos químicos y biológicos, para mitigar el impacto ambiental y sanitario del río Machángara y mejorar la calidad de vida de la población afectada.

## I. INTRODUCTION

The problem of water pollution is a contemporary challenge worldwide. This phenomenon is not only limited to industrialized or developing countries but affects all levels of our society [1]. The water quality in river basins is primarily determined by natural factors such as soil type, and geology. However, human activities, particularly agriculture, livestock, and urbanization along river sub-basins, are the predominant sources of pollution in Ecuador [2].

In Ecuador, the situation reflects a mixed response to water treatment efforts. By 2019, 70.1% of Ecuador's autonomous decentralized municipal governments (GADMs) had implemented urban wastewater treatment processes. In contrast, 26.3% had no treatment at all, opting to discharge directly into water bodies [3]. This uneven implementation has led to significant pollution, especially in urban basins. The highland region hosts the largest number of treatment plants, representing 50% of the total in Ecuador, while 31% are located in the coast region, 18.5% in the amazon region, and 0.5% in the insular region.

The direct discharge of sewage and waste into urban drainage basins is the main source of water pollution [4]. Rivers are affected by fecal coliforms, detergents, nitrates, phosphates, oils, and fats that exceed the limits set by national environmental regulations. Rivers with compromised water quality often lose their self-purification capacity, resulting in severe ecological imbalances that threaten biodiversity, and the sustainability of these ecosystems [5].

To satisfy human needs, a daily consumption of three liters of drinking water, and a total of twenty liters for anthropogenic activities is required. Ecuador has the remarkable advantage of having at its disposal a freshwater supply of 22500 , a figure that exceeds the 1000 , recommended by the World Health Organization (WHO) [6]. This situation reflects the amount of water consumed by the population, which increases the pollution of rivers and seas. It affects not only the supply of drinking water, but also the health of the organisms that depend on it. It also causes adverse health effects such as reproductive problems, kidney damage, neurological diseases, and cancer [7].

The Quito city exemplifies the water quality challenges faced by urban centers. Historically, the wastewater of it was discharged directly into nearby streams and rivers. However, rapid population growth has exacerbated wastewater production, significantly degrading the quality of these water bodies [8]. The high population density of cities is a factor that aggravates the pollution of their water resources, since there is a greater emission of waste, and liquid effluents [9]. With a current population of 2.8 million, expected to reach 4.2 million by 2040, the pressure on Quito's water resources is expected to intensify [4].

Nowadays, the Machangara river is the main destination of wastewater of Quito. It has a total length of 22.5 kilometers, where it receives 76% of the entire city's effluent [10]. The river is the result of the confluence of various small rivers, including the "Rio Grande", "Quebrada Ortega", "Quebrada Rumipamba", and "Quebrada El Batán" [11]. The Machangara river sanitation project carried out by the German Cooperation Agency in 1991, identified the main types of industries in the Quito city, and their potential environmental impacts. The food industry produces high pH, sulfites, detergents and sediments, while the textile industry produces high pH, fats, oils, heavy metals, sulfites and sulfates. Tanneries, on the other hand, emit high levels of pH, floats, sulfide, sulfite, sulfate, dyes, and salts. The chemical industry is responsible for emissions of solvents, floating sulfates, sediments, fats, greases, heavy metals, dyes, biocides, surfactants, halogenated hydrocarbons, fats, oils, ammonium, nitrates, and phosphates [10].

In recent years, several environmental assessment studies have been conducted on the Machangara river. They have revealed environmental impacts due to the generation of odors, and the discharge of industrial effluents that exceed the limits allowed by environmental legislation. In response to this alarming situation, the Environmental Sanitation Program (PSA) of the Metropolitan Public Company of Drinking Water and Sanitation of Quito (EPMAPS-Q) implemented the "Plan for the Decontamination of Quito's Rivers" in 2007. It included the collection and treatment of wastewater from parts of the city. In 2017, the first wastewater treatment plant was inaugurated in "Quitumbe" sector, the first in the city, but no noticeable results have been seen. Therefore, pollution is still visible. A press release published in the newspaper "El Comercio" in September 2019 showed that, despite the inauguration of the first wastewater treatment plant in southern Quito, the pollution situation of the Machangara river remains alarming. The treatment plant built in the "Quitumbe" sector has the capacity to treat up to 9.5 million liters of wastewater per day. However, the plant is not operating at 100% capacity due to technical problems. In addition, illegal discharges of wastewater into the river have been detected from areas surrounding the treatment plant, which has led to criticism from environmental organizations, and citizens in general [12]. The study performed by Campaña et al. [4], evaluated various environmental parameters of the river, including temperature and pH, which are in compliance with Ecuadorian regulations. However, the values of Biochemical Oxygen Demand ( $BOD_5$ ), Chemical Oxygen Demand ( $CO_2$ ), dissolved oxygen, and turbidity exceed the limits established by the regulations. Furthermore, the presence of heavy metals such as chromium (Cr), and cadmium (Cd) exceeds acceptable levels for agricultural use [13], highlighting the urgent need for more effective environmental management and pollution control measures.

## 1.1 LOCATION OF STUDY

The Machángara river is one of the main ones in Quito. It crosses the entire city, originating in the south in the “Cutuglagua” sector [14], spanning a total length of 22 kilometers. The river receives domestic and industrial effluents from the city [15]. It joins the “San Pedro” river in “Nayon”, which, together with the “Pisque” river, forms the “Guayllabamba” river, a tributary that reaches “Esmeraldas”, and flows into the Pacific ocean [16].

As a river located in an urban environment, the Machángara river presents significant problems for the inhabitants of this sector, such as unpleasant odors, the proliferation of harmful animals, and vectors that transmit diseases [17]. Likewise, like many rivers in Quito, it is characterized by deep riverbeds, and steep slopes, which limit access for any type of sampling. Along the riverbanks, abandoned structures in an advanced state of deterioration can be observed, which has an unfavorable impact on the aesthetics of the city [18].

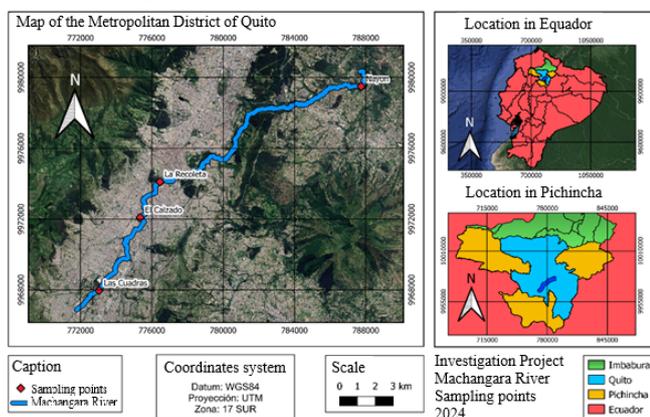
## 2. METHODS

To assess the biodegradability index of the organic matter in the Machángara river, wastewater sampling from discharge pipes located along the riverbanks was conducted, following the methodology described by Larrea et al. [19]. According to their study, “*sampling aims to provide accurate information for evaluating the presence of emerging pollutants*”, which in this case, helped to identify the types of contaminants present in the river and to determine the most appropriate treatment methods based on the biodegradability index [28, 29, 30].

The sampling of wastewater from the outfall pipes was performed during the period between 2022 and 2023, specifically in the months of October, December, February, April, June, August and October. Four strategic points along the Machángara river were considered, as shown in Figure 1.

**Figure 1.**

Map of sampling site locations (The map of strategic points for water samples collection)



These points were chosen to take different points along the river. The point 1 (P1) is located in the “Las Cuadras” park in the southern part of the city, the point 2 (P2) is located in the “El Calzado” park, the point 3 (P3) is near to the place “La Recoleta” (located close to Quito’s historic center), and the point 4 (P4) is in the rural community of “Nayon”, located in the northern part of the city.

Table 1 below shows the UTM coordinates obtained from Google Maps with the sectors corresponding to the selected sampling points along the Machángara river.

**Table 1.**

Coordinates of the sampling points (WGS84 UTM 17S)

Point	Sector	Coordinates	
P1	Las Cuadras	773041.77 E	9967956.90 N
P2	El Calzado	775349.40 E	9972083.50 N
P3	La Recoleta	776456.37 E	9974102.29 N
P4	Nayon	787752.00 E	9979495.70 N

Subsequently, a reconnaissance and characterization of each sampling point was conducted to gather primary data. Observations were made regarding the pollutants present in the river, and along its banks. The anthropogenic activities taking place, as well as an evaluation of the existing flora and fauna at each sampling site. Surveys were also administered to gather the perceptions of the local population regarding river contamination.

At the first sampling site P1, located in “Las Cuadras” park in Quitumbe, the presence of both solid urban waste and foam in the water was documented. As described by Cevallos [20], “the presence of surfactants and detergents can generate foam, while solid materials serve as sources of pollution, impeding the proper ecological function of the river if their composition is incompatible with the aquatic environment”. Among the waste observed were plastic covers, cups, soda bottles, cleaning containers, water bottles, food wrappers, and fragments of household items and textiles. Despite this contamination, diverse plant species, including cedar, walnut, pumamaquis, and nettle, were recorded. Additionally, wild birds, insects, and rodents were noted in the area.

The second sampling site P2, located in the “Parque Lineal Machángara” within the “El Calzado” park, featured a variety of flora such as cedar, eucalyptus, nettle, and zambo trees. However, solid waste, including branches carried by the current, was also present. This area is affected by several sources of pollution, particularly plastics and organic waste from pets, which are often left uncollected by their owners. As noted by Cevallos [20], “biological contaminants from human and animal feces pose risks to river health by fostering the proliferation of bacteria, fungi, viruses, and protozoa”. In this location, a low diversity of large shrubs, and trees was observed, with undergrowth surrounding the discharge pipe. Regarding

fauna, terrestrial species were absent, though birds such as pigeons and blackbirds were seen in the vicinity.

The third site P3, situated in the “Parque Río Machángara”, exhibited substantial urban waste, including bottles, plastic bags, polypropylene containers, organic matter, and surfactants. Although this location is easily accessible, it poses a significant safety risk due to an old, deteriorating bridge needed to cross the river, which is in disrepair. Wastewater at this site is discharged directly into the river via a concrete channel. The steep slopes in this area lead to the accumulation of debris on the embankments, further exacerbating pollution. The dominant plant species observed was Kikuyo grass, described by Gonzalez [21], as “drought-resistant and acting as a natural herbicide”. Although, it is considered an invasive species and commonly used to feed livestock in nearby areas. Additionally, the accumulation of garbage has attracted rodents and insects, which have significant environmental and public health implications.

The fourth sampling point P4 in “Nayon”, known as “Quebrada de Tanda or Quebrada Urahuaycu”, near the Nayon hydroelectric plant. The presence of solid waste, mainly plastic, and polypropylene, has been detected on the banks of the river, as well as a large number of surfactants floating on the surface of the water. Despite this, the site is easily accessible and has adequate infrastructure to carry out the activity without physical risks. Regarding the pollution in the sector, there is an accumulation of garbage on the river banks, including plastic bags, food leftovers, and glasses. In addition, to the presence of a hydroelectric plant, and numerous nearby housing developments. In terms of flora, native shrubs, and plants such as ferns, chilcas, and kikuyo were observed. As for the fauna, a wide variety of species were recorded, such as wild birds and chickens, as well as cows, rats, and some insects near the discharge point.

In addition, in this investigation, information was collected in March 2023, obtaining a high margin of contamination observed by the population in the surrounding areas. Since more than 70% of those surveyed consider them to have a high level of contamination. More than half of those surveyed at all four sampling points reported noticeable foul odors emanating from the Machángara river. The highest percentage of this perception was reported at point 3, which is the “La Recoleta” sector, with 99%. The presence of foul odors can be a sign of water contamination, and although it does not always directly indicate the presence of toxic substances, it is important to consider this perception of the respondents as a warning sign about the quality of the river water [22]. The presence of these odors has been related to various symptoms, including headaches, nausea, vomiting, diarrhea, fatigue, difficulty concentrating, and depression. According to the respondents, children are the most affected population by the contamination of the Machángara river, with the

highest percentage on point 2 “Parque el calzado” (63%), and the lowest in point 4 “Nayon” (44%). Therefore, it can be affirmed that all respondents in the different sectors agree that the child population is the most affected by this contamination. Furthermore, 97% of all surveyed agreed on the necessity of mass environmental education campaigns to promote social responsibility and increase awareness about environmental protection.

The process of determining the biodegradability of organic matter was carried out by sampling in the areas of interest. Considering their representativeness in the study, four sampling points were selected as there was evidence of the presence of pipes with direct discharges to the effluent. Several parameters such as pH, total dissolved solids (TDS), conductivity, temperature, alkalinity, turbidity, total suspended solids (TSS) and residual chlorine were measured in situ. While for the Biochemical Oxygen Demand (BOD) and the Chemical Oxygen Demand (COD) of the water resource was analyzed directly in the laboratory. Subsequently, the biodegradability index was quantified according to the following ratio formula [23]. Equation 1 shows the formula for the biodegradability index.

Depending on the value obtained, the nature of the effluent is indicated, and interpreted. If the effluent contains organic matter, degradation is relatively easy. Although, there are exceptions such as fats, and oils, as well as inorganic matter [24]. The range that classifies the two types of effluents is shown in Table 2.

**Table 2.**  
Organic and inorganic waste by biodegradability value [24]

Type of discharge	
Inorganic	<0.2
Organic	>0.6

The intermediate ranges in the COD ratio, between 0.2 and 0.5, could indicate the combined presence of organic and inorganic effluents.

The ability to degrade organic compounds provides another variation for the result, which is reflected in Table 3, where the biodegradability capacity of the effluent is shown according to the ratio.

**Table 2.**  
Relationship between the ratio and biodegradability in water [26]

Biodegradability	
Highly biodegradable water	>0.6
Fairly biodegradable water	0,4-0,6
Poorly biodegradable water	0,2-0,4
Non-biodegradable water	<0.2

The results will also serve to establish an optimal purification mechanism for the organic matter present in the Machángara river, as shown below:

**Table 3.**

Relationship between the ratio and the type of water [26]

Type of water	
Highly biodegradable water	>0.6
Can be treated biologically	0,3-0,6
Not biologically treatable	<0.3

## 2.1 BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND (BOD5) AND CHEMICAL OXYGEN DEMAND () ANALYSIS

### 2.1.1 Determination of BOD by the APHA 5210 – B method.

The Biochemical Oxygen Demand (BOD) test is used as an indirect measure of the amount of organic matter in a sample. This analysis involves measuring the change in dissolved oxygen (DO) concentration, caused by microbial activity that degrades organic matter in a sample. That is kept in a closed bottle and incubated under specified temperature and dark conditions for 5 days. DO measurements are taken before and after incubation, and BOD is calculated from the difference between these measurements. The first DO measurement is taken shortly after sample dilution, and any additional oxygen consumption that occurs after this measurement is added to the BOD [25].

### 2.1.2 Determination of Chemical Oxygen Demand (COD) by the APHA 5220 – D method.

In Chemical Oxygen Demand (COD) analysis, the dichromate ion is used to oxidize the constituents present in the sample. This process induces a change in the state of chromium from hexavalent (VI) to trivalent (III), with both coloring properties and absorption in the visible region of the spectrum. The dichromate ion shows high absorption in the 400 nm region, while the absorption of the chromic ion is significantly lower in this region. On the other hand, the chromic ion shows strong absorption in the 600 nm region, where dichromate has hardly any absorption. In 9M sulfuric acid solution, the molar extinction coefficients for these forms of chromium are approximately as follows: is 50 L/mol cm at 604 nm, is 380 L/mol cm at 444 nm, and is 25 L/mol cm at 426 nm. Therefore, the point of maximum absorbance is at 420 nm. For COD concentrations between 100 and 900 mg/L, there is an increase in concentration in the 600 nm region. It is possible to dilute the sample to obtain higher values. For COD concentrations equal to or less than 90 mg/L, the reduction of the dichromate ion is de-

termined at 420 nm. Although, the corresponding formation of causes a slight increase in absorbance at 420 nm, this effect is accounted for in the calibration procedure [25].

## 3. RESULTS

The following are the results of the analysis of the 5-day Biochemical Oxygen Demand (BOD5) and Chemical Oxygen Demand (COD) at four sampling points during a period of one year.

In terms of BOD5, sampling point 2 (El Recreo) had the highest mean value with  $199.71 \pm \text{DE } 66.67$  mg/L, followed by point 3 (La Recoleta) with  $205.43 \pm \text{DE } 58.00$  mg/L, point 1 (Las Cuadras) with  $106.14 \pm \text{DE } 75.50$  mg/L, and finally point 4 (Nayon) with the lowest mean value of  $19.29 \pm \text{DE } 21.55$  mg/L (Table 5). The minimum BOD5 value was recorded in P4 with 5 mg/L and the maximum in P1 with 285 mg/L. These results indicate that P2 and P3 have significantly higher and variable BOD5 values throughout the year, with notable peaks in February, June and August. In contrast, P4 showed low variability with a peak in October 2022.

For COD, the sampling points followed a similar pattern as for BOD5. The point P2 had the highest mean value with  $395.86 \pm \text{DE } 104.68$  mg/L, followed by the point P3 with  $395.86 \pm \text{DE } 104.68$  mg/L, P1 with  $221.86 \pm \text{DE } 117.17$  mg/L and the point P4 with the lowest mean value of  $31.00 \pm \text{DE } 28.77$  mg/L. The minimum COD value was observed in point P4 with 9 mg/L and the maximum in point P2 with 531 mg/L, indicating significant variations. As with BOD5, point P2 and point P3 showed significantly high and variable COD values, with peaks in February, April, and August, while in point P4 showed less variability and a peak in October 2022. When comparing the four sampling points, it is observed that in point P2 and P3 have higher and more variable organic pollution levels, both in BOD5 and COD, especially in certain periods of the year such as February and August. This could indicate environmental influences or specific activities that affect water quality at these points. In point P1, although it also shows variability, it shows moderate levels of contamination compared to the two previous points. On the other hand, point P4 stands out for its consistently low levels of organic contamination, with little variability throughout the year.

**Table 5.**

BOD5 and COD parameters of the sampling points in the period of one year (2022-2023)

Sampling points	Parameters	Study period						
		October	December	February	April	June	August	October
		2022	2022	2023	2023	2023	2023	2023
Las Cuadras (P1)	BOD5	65	38	102	77	93	285	83
	COD	158	120	307	108	276	448	136
El Recreo (P2)	BOD5	120	146	316	232	193	161	230
	COD	248	269	531	387	470	397	469
La Recoleta (P3)	BOD5	159	163	205	266	277	252	116
	COD	320	341	468	469	451	508	214
Nayón (P4)	BOD5	66	18	7	9	6	5	24
	COD	91	23	13	20	14	9	47

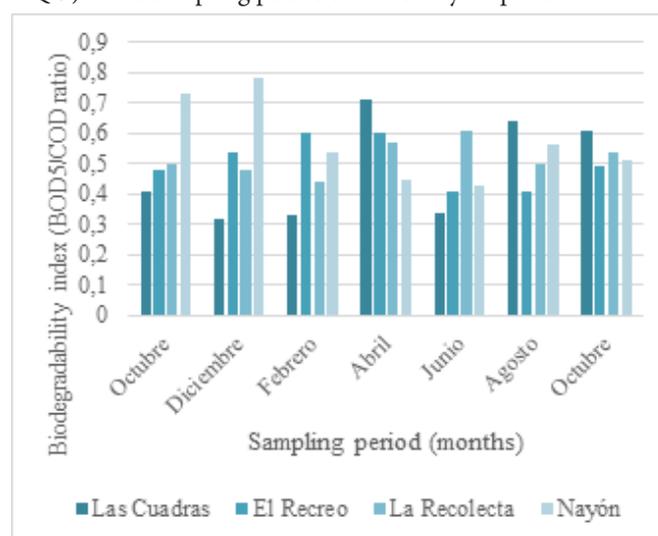
Since the biodegradability index values are moderate to high (minimum 0.32, maximum 0.78) in the different measurements over a year (Table 6). It could be concluded that water contains a significant amount of biodegradable organic matter. In addition, there are seasonal variations that should be taken into account in the implementation of wastewater treatment. At the sampling point P1, April 2023 and August 2023 stand out as the periods with the greatest influence on the biodegradability index, with values of 0.71 and 0.64, respectively (Table 6 and Figure 2). At the sampling point P2, the months of February 2023 and April 2023 show a higher biodegradability with indexes of 0.60, while June and August 2023 show lower indexes around 0.41. On the other hand, the sampling point P3 shows significant variations with a maximum in June 2023 with a biodegradability index of 0.61 and a minimum in February 2023 of 0.44. At the sampling point P4, December 2022 stands out with an index of 0.78, showing high biodegradability compared to June 2023, which shows an index of 0.43. These differences highlight the importance of taking into account seasonal variations when evaluating the capacity of wastewater to biodegrade organic matter, which is crucial for effective water resource management and environmental protection.

Over the one-year period, the total biodegradability indexes (BOD5/COD) were 0.48, 0.50, 0.52, and 0.57 for P1, P2, P3, and P4 sampling points, respectively (Table 7). The sampling point P1 has the lowest index with 0.48, which indicates that approximately 48% of the COD load at this point is biodegradable. This suggests a significant presence of non-biodegradable organic matter or complex chemical compounds that require more specific treatment methods for their effective removal. On the other hand, the sampling point P2 has an index of 0.50, which indicates a similar proportion of biodegradable organic matter compared to P1, but with a slight improvement in

biodegradability. As for P3, a biodegradability index of 0.52 was recorded, indicating a moderately high level of biodegradable organic matter in relation to the total COD load. This could be due to the environmental conditions and the composition of the pollutants, which favor greater degradation by the microorganisms present in the water. Finally, the sampling point P4 has the highest index at 0.57, indicating that approximately 57% of the COD load at this sampling point is biodegradable. This could indicate a simpler pollutant composition or a lower total organic load, which is favorable from a water quality perspective.

**Figure 2.**

Temporal variation of the biodegradability index (DBO5/DQO) at the sampling points over a one-year period

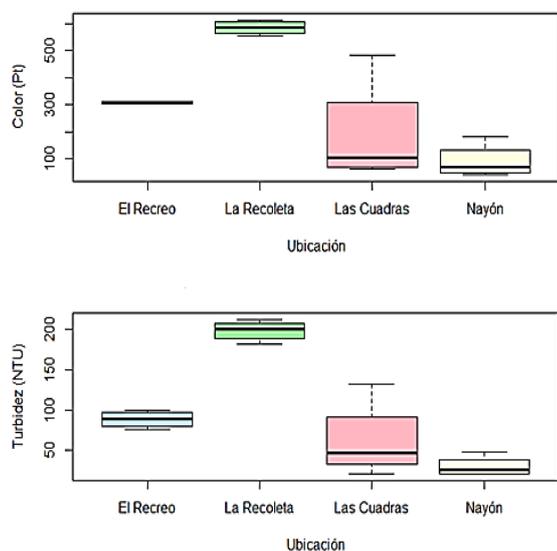


The results obtained for the biodegradability index (BOD5/DQO) for the different wastewater sampling points classify the water as fairly biodegradable, with values ranging from 0.48 to 0.57 (Table 7). This biodegradability is related to the presence of mixed discharges with a significant proportion of biodegradable organic matter. At sampling points such as P2, P3, and P4 could be considered that there is a tendency towards organic matter. In relation to the recommended treatment, the analyses indicate that the evaluated wastewater requires mainly a biological treatment approach to effectively reduce the organic load. Effective treatment of this water resource is likely to include aerobic biological processes, such as biological oxidation, to break down biodegradable organic matter to reduce COD levels. In addition, initial physicochemical treatment may be required to adjust pH, remove suspended solids, and other contaminants that could interfere with biological processes.

In addition, during the development of this research, color and turbidity were measured in situ at the four sampling points and analysis of variance (ANOVA) was applied as described below:

**Figure 3.**

Sampling location-related relationship between color and turbidity.



From the information obtained in Figure 3, it was determined that there are significant differences in the color and turbidity measurements taken in the water of the Machángara river with respect to the sampling locations. Therefore, there is a greater variation in water quality for points P2, and P3 with respect to the rest of the sampling points in the river.

Finally, this study also aims to be a contribution to the study of the biodegradability index in the rivers of Ecuador. In this regard, there are already some contributions in this regard, as can be seen in a study carried out by

Molina [27], on the quality of water in a sector of the city of Manta. The results obtained by calculating the biodegradability index indicate that the levels of contamination are high, falling within the range of high biodegradability of organic matter, as indicated by other similar studies.

#### 4. CONCLUSIONS

Through the physicochemical analysis of the water of the Machángara river, data on biochemical, and chemical oxygen demand were obtained from October 2022 to October 2023. The biodegradability index was determined with these values, to establish, as a recommendation in this research, the application of a biological treatment to reduce the organic load, which can be accompanied by a chemical treatment to avoid interference from suspended solids and other impurities present in the water.

Likewise, this tributary was characterized as fairly biodegradable with the presence of mixed discharges containing organic and inorganic pollutants coming mainly from the anthropogenic activities developed in the study area. The presence of illegal pipes coming from homes and industries that discharge directly into the river. In addition, by measuring in situ parameters such as color and turbidity in the water coming from the Machángara river. It was concluded that in the point P2 and P3, there are high levels of contamination that significantly affect water quality, while in the point P1 and P4, there are moderate levels. Urgent interventions, alongside stronger public awareness efforts, are essential to restore water quality and mitigate the river's environmental and public health impacts.

On the other hand, we must point out that there are various types of biological treatments that can be carried out in these cases, taking into consideration many aspects, among which may be, depending on the type of contaminant and the medium to be treated. Among the most common are aerobic biological treatment and anaerobic biological treatment. Aerobic biological treatment, this process is mainly used for the treatment of urban and industrial wastewater, where microorganisms decompose organic matter in the presence of oxygen. While anaerobic biological treatment is used in the treatment of wastewater from the food and agricultural industry, where microorganisms decompose organic matter in the absence of oxygen, generating biogas as a byproduct.

#### REFERENCES

- [1] R. Guadarrama Tejas, J. Kido Miranda, G. Roldan Antunez, y M. Salas Salgado, «Contaminación del agua, Ciencias Ambientales y Recursos Naturales», pp. 1-10, 2016.
- [2] G. Pauta, M. Velazco, D. Gutierrez, G. Vázquez, S. Rivera, O. Morales, A. Abril, «Evaluación de la calidad de agua

- de los ríos de la ciudad de Cuenca, Ecuador», Maskana, pp. 76-88, 2019.
- [3] K. Mero, «Evaluación de las características fisicoquímicas y toxicológicas en aguas residuales de industrias farmacéuticas para la verificación de la calidad del agua en la parroquia Tarqui y Pascuales, provincia del Guayas», Universidad Estatal de Milagro, 2023.
- [4] A. Campaña, E. Gualoto, y V. Chiluisa, «Evaluación físico-química y microbiológica de la calidad del agua de los ríos Machángara y Monjas de la red hídrica del Distrito Metropolitano de Quito», Bionatura, vol. 2, 2, pp. 305-310, 2017.
- [5] J. Morocho, «Evaluación de la remoción de nitratos y fosfatos con microalga, especie "Chorella Vulgaris" en agua residual procedente del río Machángara del sector Chimbacalle, cantón Quito, provincia Pichincha 2022-2023», Universidad Politécnica Salesiana, 2023.
- [6] C. Soto, E. Reina, «Análisis de la calidad del agua en la subcuenca del río Coca. Estudio técnico: DN-CA-DHN-12-01. Coca, Ecuador», Secretaría Nacional del Agua, 2012.
- [7] Organización Mundial de la Salud, «Guías para la calidad del agua de consumo humano», 2018.
- [8] L. Gómez, M. Torres, A. Landázuri, L. Mayorga, «Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito», PDRQ, 2014.
- [9] B. Villacis, «La crisis del oro azul: un análisis de la sustentabilidad del agua en la ciudad de Quito», Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, 2005.
- [10] I. Chisaguano, «Evaluación Ambiental del Río Machángara», Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [11] A. Aguilar, «Modelación hidrológica de crecidas en la Cuenca del río Machángara en la ciudad de Quito», Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [12] El Comercio, «Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Quitumbe procesa 80 litros de desechos por segundo», 2019. Available at: <https://www.elcomercio.com/videos/agua-residual-quitumbe-tratamiento-desechos.html>
- [13] E. Hidalgo, E. Osorio, «Evaluación y determinación de la capacidad secuestrante de los metales pesados cromo (Cr) y cadmio (Cd) por taxas de mohos aisladas de los alrededores de los ríos Cutuchi y Machángara», Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2013.
- [14] El Telégrafo, «El río Machángara es un foco de contaminación», 2017. Available at: <https://www.itelegrafo.com.ec/noticias/quito/1/el-rio-machangara-es-un-foco-de-contaminacion>
- [15] J. Martínez, «El Machangara y el incansable intento por descontaminarlo», 2019. Available at: <https://www.expreso.ec/actualidad/machangara-incansable-descontaminarlo-19742.html>
- [16] MAATE, «Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica», 2019. Available at: [https://www.ambiente.gob.ec/sedimentos-que-llegan-hacia-man-](https://www.ambiente.gob.ec/sedimentos-que-llegan-hacia-man-duriacu-son-arrastrados-por-el-guayllabamba-desde-el-inicio-de-su-formacion/)
- duriacu-son-arrastrados-por-el-guayllabamba-desde-el-inicio-de-su-formacion/
- [17] J. Guerrero, «Tratamiento de aguas residuales utilizando un consorcio de microorganismos encapsulados obtenido del río Machangara, Quito: s.n.», 2016.
- [18] I. Reinoso, «Evaluación del Río Machángara, Escuela Politécnica Nacional», 2015.
- [19] J. Larrea, B. Romeu, D. Lugo, M. Rojas, «Aspectos fundamentales del monitoreo de calidad de las aguas: el río almdares como caso de estudio», CENIC, 2(53), pp. 148-159, 2022.
- [20] D. Cevallos, «Los derechos del río Machángara», Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2020.
- [21] K. Gonzalez, «Ficha Técnica del Pasto Kikuyo (Pennisetum clandestinum) », 2020. Available at: <https://infopastosyforrajes.com/pasto-de-pastoreo-de-clima-frio/pasto-kikuyo-pennisetum-clandestinum>
- [22] H. Yamberla, «Sistema electrónico para medir los niveles de contaminación del aire provocado por la desembocadura de aguas servidas en el Río El Tejar en el sector el Batán del cantón de Otavalo provincia de Imbabura», Universidad Técnica del Norte, 2023.
- [23] J. Arteaga, D. Chingal, «Diagnóstico ambiental del "Bosque Protector Proyecto Ecológico Chiriboga" hacia la inclusión al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (SNAP) y propuesta de estrategias de conservación», Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [24] P. Osorio, D. Peña, «Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región», 2002. Available at: <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-cristiana-de-bolivia/algebra-lineal/trab-12-apuntes/10467385>
- [25] E. Rice, L. Bridgewater, A.P.H. Association, «Standard methods for the examination of water and wastewater», 10(23), 2012.
- [26] R. Miranda, M. Oliet, T. Pérez-Corona, V. Alonso, Y. Madrid, J.C. Domínguez, P. García, «Tratamiento de Aguas Residuales: Ejercicios Resueltos y Prácticas de Laboratorio», Dextra Editorial S.L., 2019.
- [27] L. Molina, «Análisis de calidad del agua en el sector urbano del Malecón de Manta, provincia de Manabí», Universidad de Especialidades Espíritu Santo UEES, 2015. Available at: <http://repositorio.uees.edu.ec/handle/123456789/2178>
- [28] R. Saravanathamizhan, V.T. Perarasu, «Chapter 6 - Improvement of Biodegradability Index of Industrial Wastewater Using Different Pretreatment Techniques», Wastewater Treatment, Elsevier, pp. 103-136, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821881-5.00006-4>.
- [29] F. Liu, D. Wang, «Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers: A meta-analysis», Science of The Total Environment, Vol. 818, pp. 151828, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151828>.

[30] N.T. Anh, L.D. Can, N.T. Nhan, B. Schmalz, T.L. Luu, «Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review», *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, Vol. 8, pp. 100424, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100424>.

## ANNEXES

**Table 6.**

Biodegradability index calculated for each sampling point over a one-year period (2022-2023).

Biodegradability index (BOD5/ COD)	Study period						
	Oct.	Dec.	Feb.	Apr.	Jun.	Aug.	Oct.
	2022	2022	2023	2023	2023	2023	2023
Las Cuadras	0,41	0,32	0,33	0,71	0,34	0,64	0,61
El Recreo	0,48	0,54	0,60	0,60	0,41	0,41	0,49
La Recoleta	0,50	0,48	0,44	0,57	0,61	0,50	0,54
Nayon	0,73	0,78	0,54	0,45	0,43	0,56	0,51

**Table 7.**

Type of discharge, biodegradability of the water and recommended treatment according to the ratio.

	Biodegradability index (BOD5/COD)	Type of discharge	Water biodegradability	Recommended treatment
Las Cuadras	0.48	Mixed	Fairly biodegradable water	Biological
El Recreo	0.50	Mixed	Fairly biodegradable water	Biological
La Recoleta	0.52	Mixed	Fairly biodegradable water	Biological
Nayon	0.57	Mixed	Fairly biodegradable water	Biological



# REVISTA INGENIO

## Análisis de la Transición hacia la Movilidad Sostenible: Estrategias de Negocio para la Adopción Masiva de Vehículos Eléctricos en el Mercado Automotriz en la Ciudad de Guayaquil - Ecuador

### Analysis of the Transition Towards Sustainable Mobility: Business Strategies for the Mass Adoption of Electric Vehicles in the Automotive Market in the City of Guayaquil – Ecuador

Raquel de los Angeles Salas Ibarra |  Universidad Politécnica Salesiana – UPS, Guayaquil - Ecuador  
David Humberto Cárdenas Villacrés |  Universidad Politécnica Salesiana – UPS, Guayaquil - Ecuador  
Alexander Emanuel Torres Romero |  Universidad Politécnica Salesiana – UPS, Guayaquil - Ecuador

Recibido: 30/9/2024  
Recibido tras revisión: 4/10/2024  
Aceptado: 5/11/2024  
Publicado: 03/01/2025

#### PALABRAS CLAVE

Movilidad sostenible, vehículos eléctricos, mercado automotriz, estrategia empresarial, viabilidad económica.

#### KEY WORDS

Sustainable mobility, electric vehicles, automotive market, business strategy, economic viability

#### RESUMEN

Este estudio examina la transición hacia la movilidad sostenible en Guayaquil, Ecuador, especialmente en la adopción de vehículos eléctricos mediante estrategias empresariales. Se destaca la importancia de concienciar sobre la conservación ambiental y superar desafíos como la viabilidad económica y la disponibilidad de infraestructura de carga. Se enfatiza la colaboración entre diferentes sectores para fomentar la aceptación de los vehículos eléctricos y se señala la necesidad de inversión estatal en electrolineras públicas para mejorar la accesibilidad. Estas medidas no solo impulsarían la movilidad sostenible, sino que también posicionarían a Guayaquil como líder en tecnologías limpias en el mercado automotriz.

#### ABSTRACT

This study examines the transition to sustainable mobility in Guayaquil, Ecuador, especially in the adoption of electric vehicles through business strategies. It highlights the importance of raising awareness of environmental conservation and overcoming challenges such as economic viability and availability of charging infrastructure. It emphasizes collaboration between different sectors to foster the uptake of electric vehicles and points out the need for government investment in public charging stations to improve accessibility. These measures would not only boost sustainable mobility, but also position Guayaquil as a leader in clean technologies in the automotive market.

## I. INTRODUCCIÓN

Si bien es cierto la movilidad sostenible no es un tema reciente, apareció inicialmente en el libro verde de la CE en 1992, señalando sobre el impacto que produce el transporte al medio ambiente, las implicaciones y desafío global común que conlleva el desarrollo sostenible [1]. En este sentido, [2] afirma que el libro verde admitió que a pesar de que el transporte impulsado por combustión interna había contribuido a grandes beneficios activando la economía, el comercio y facilitando los viajes a escala mundial, también conllevaba costos sustanciales con relación al impacto ambiental (gases contaminantes) y su dependencia de los recursos no renovables, como el petróleo, volviéndose insostenible.

Según la literatura [3] observaron que la movilidad urbana en el Ecuador presentaba grandes problemas

debido a la escasa normativa, leyes o legislación existente en el medio. Esta falta de regulación limita la capacidad de controlarla contaminación de gases emitidos por vehículos a combustión. En este contexto, la tecnología de vehículos eléctricos se presenta como una posibilidad viable para la transición hacia una movilidad sostenible, ya que estos vehículos no emiten gases contaminantes, los datos indican que el consumo medio de los vehículos eléctricos (VEs) disponibles en el mercado es de aproximadamente 14 kWh/100 km. En comparación, las emisiones medias de los vehículos híbridos son de 0.234 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Por otro lado, los vehículos diésel urbanos de 100 CV tienen un consumo de 5 L/100 km, produciendo 2.67 kg CO<sub>2</sub> por cada litro de diésel. Esto significa que las emisiones de CO<sub>2</sub> de un vehículo eléctrico serían de 3.30 kg CO<sub>2</sub> por

cada 100 km, mientras que las de un motor diésel serían de 13.30 kg CO<sub>2</sub> por la misma distancia. Esta diferencia resalta la mayor cantidad de contaminantes emitidos por los vehículos diésel. Igualmente, los vehículos eléctricos no solo contribuyen a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, sino también de otros gases contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los hidrocarburos (HC). En conclusión, el uso indiscriminado de combustibles fósiles tiene un mayor impacto negativo en el medio ambiente. Por lo tanto, una solución futura viable sería la transición hacia la adopción de vehículos impulsados por energía eléctrica. Además de la eficiencia, el consumo juega un rol importante para comprender las diferencias entre los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna. En el caso de los vehículos eléctricos disponibles en el mercado, exceptuando los modelos industriales, el consumo medio es de aproximadamente 12.65 kWh por cada 100 km. Estos 12.65 kWh reflejan la energía contenida en la batería. Sin embargo, la electricidad requerida para que esta energía llegue a las ruedas proviene de una toma de corriente o una central eléctrica, y la cantidad necesaria es un poco mayor debido a las pérdidas en el transporte y en el proceso de carga de la batería. Las pérdidas promedio son del 6.32%, lo que resulta en un rendimiento del 93.7% [4].

En relación con la movilidad sostenible [5] destacan su papel crucial en ciudades con rápido crecimiento urbano y económico. Guzmán et al. [6] señalan que los trayectos hacia el lugar de trabajo son los momentos más congestionados, especialmente durante las horas pico en zonas urbanas. Esto subraya la necesidad de que tanto las organizaciones públicas como privadas desarrollen estrategias de movilidad para no solo reducir la congestión y la contaminación, sino también para incentivar a los usuarios a adoptar alternativas a los vehículos de combustión. Por otro lado [7], enfatiza que no es viable mantener los mismos patrones de producción, energía y consumo actuales. Es esencial una transición hacia un futuro sostenible a largo plazo mediante el desarrollo de estrategias que ayuden a las comunidades a progresar social, económica y ambientalmente.

Por lo cual [8] indican que la sostenibilidad se ha transformado en una inquietud apremiante a lo que respecta la política de transporte y planificación de movilidad a nivel mundial. El concepto de movilidad sostenible está ampliamente definido, lo que posibilita que se establezcan políticas y enfoques prácticos. Según indica la Organización de las Naciones Unidas, para el 2050 aproximadamente 66% de la población mundial vivirá en áreas urbanas, este aumento poblacional plantea desafíos significativos relacionados con la contaminación del aire, la congestión, la gestión de desechos y salud pública, especialmente debido al crecimiento masivo del parque automotor. En [9] y [10] respaldan esta proyección en su investigación.

Adicionalmente [11], mencionan que el progreso de una ciudad está influenciado por una serie de factores e intereses individuales que guían la adopción de diversas formas de desplazamiento, la comprensión de la disposición de actividades y de los factores más destacados en los movimientos sociales dentro de una ciudad, resulta fundamental para realizar una adecuada caracterización urbana, no obstante, el crecimiento urbano sin una previa planificación y sin considerar el desarrollo sostenible conlleva la utilización masiva del transporte privado, a causa de la expansión territorial [12], por lo que [13] determinaron que es necesario guiar a los usuarios a una cultura más sostenible y sustentable.

Los incentivos gubernamentales desempeñan un papel fundamental en la decisión de compra por parte de los consumidores respecto a la adopción de vehículos eléctricos. En Ecuador se otorgan diversos incentivos económicos para los vehículos eléctricos e híbridos. La Ley Orgánica para el Fomento Productivo (LOFP) [14] exime del impuesto al valor agregado y del impuesto especial sobre consumos a los vehículos eléctricos durante un lapso de cinco años. La ley Orgánica de Eficiencia Energética de Ecuador [15], [16] en su versión original, establecía que para 2025 todos los vehículos nuevos incorporados al transporte público debían ser eléctricos, incentivando la movilidad sostenible. Sin embargo, recientemente se ha actualizado el plazo a 2030. A partir de ese año, los vehículos que entren en servicio en transporte público, tanto urbano como interprovincial, deberán ser eléctricos o de cero emisiones. Además, la ley también dispone que desde 2024, los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), en coordinación con el Comité Nacional de Eficiencia Energética, deberán desarrollar de manera obligatoria los estudios y la infraestructura necesaria para garantizar la implementación de estas medidas. En el caso de la región insular, esta disposición será evaluada por el Comité para asegurar que las condiciones sean apropiadas antes de su implementación. Asimismo, esta ley fomenta a los gobiernos locales a ofrecer incentivos con la finalidad de promover el tránsito de vehículos eléctricos. Aprobando la resolución N.016/2019 [17], se redujo al 0% el arancel a la importación de vehículos eléctricos para uso particular, transporte público y carga, cargadores para electrolineras, cargadores para vehículos y acumuladores eléctricos para vehículos eléctricos.

De acuerdo con la información brindada por la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) [18], las ventas de vehículos eléctricos han alcanzado un récord mensual, con un crecimiento del 73% durante el año 2023 en comparación con el año anterior. Este crecimiento significa que los vehículos eléctricos ahora representan el 9% de todas las ventas de vehículos por tipo de combustible. En el 2022, los vehículos electrificados representaban solo el 5% del total de ventas, por lo que este 9%

actual refleja un incremento de 4 puntos porcentuales en su participación de mercado.

Por otra parte, en 2019, la ciudad de Guayaquil implementó una iniciativa en el transporte público que consistió en la introducción de una flota de 20 buses eléctricos. Además, se instalaron estaciones de carga rápida disponibles tanto para buses como para taxis eléctricos. El municipio ha jugado un papel crucial en el impulso hacia la transición de vehículos eléctricos. Implementó medidas como pagar el 50% de la factura eléctrica durante el primer año de operación de estos vehículos, además de ofrecer incentivos de compra para los taxistas que opten por cambiar sus vehículos de combustión por modelos eléctricos [19] [20]. Esto fue posible tras la aprobación de un crédito de aproximadamente USD 8 millones otorgado a una cooperativa local por parte de la Corporación Financiera Nacional (CFN) B.P., que ha puesto a disposición su producto “Financiamiento de Movilidad Eléctrica” para el servicio de transporte público, permitiendo la adquisición de unidades, infraestructura de carga y apoyo para el servicio [21]. Esta iniciativa demuestra un compromiso sólido con la sostenibilidad y el fomento de tecnologías limpias en nuestra comunidad. De igual modo, el Automóvil Club de Ecuador (ANETA) y la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) fueron una parte fundamental para el impulso de la movilidad eléctrica en el país, donde ANETA [22] presentó una iniciativa legislativa ante los miembros de la Asamblea Nacional del Ecuador, con el fin de promover la movilidad sostenible y el avance de la electromovilidad.

## 2. MÉTODO

Para llevar a cabo esta investigación, se empleó una metodología cuantitativa con el objetivo de evaluar la viabilidad y preferencia de la población económicamente activa (PEA) de la ciudad de Guayaquil, Ecuador, con relación a la adquisición de vehículos eléctricos.

Se diseñó una encuesta estructurada dirigida a la PEA de Guayaquil, seleccionando una muestra representativa de 301 personas. Esta muestra fue elegida utilizando técnicas de muestreo aleatorio para garantizar la representatividad de la población objetivo.

### 2.1. RECOPIACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE INFRAESTRUCTURA (ESTACIONES DE CARGA) PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Se llevó a cabo una exhaustiva verificación de la infraestructura física necesaria para el funcionamiento óptimo de los vehículos eléctricos. Se visitaron y evaluaron las estaciones de carga rápida, ubicadas tanto en el norte como en el sur de la ciudad. Estas estaciones, financiadas e instaladas por instituciones privadas, representan una iniciativa para promover el uso de vehículos eléctricos. Se

verificó su estado y funcionamiento, incluyendo el tipo de conexión eléctrica, conectores y la operatividad de los dispositivos de carga, así como también los requisitos necesarios para la carga de los vehículos eléctricos la cual varía de acuerdo con la institución. Además, se verificó las ubicaciones de estas estaciones de carga para comprender su accesibilidad geográfica y su impacto en la conveniencia de la adopción de vehículos eléctricos.

### 2.2. DISEÑO DE ENCUESTA, SELECCIÓN DE MUESTRA, Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la selección de la muestra, se emplearon técnicas de muestreo aleatorio con el objetivo de garantizar la representatividad de la población económicamente activa (PEA) de Guayaquil. Es importante destacar que, en el proceso de selección, no se tomaron en cuenta variables de sexo, ya que este factor no era relevante para los objetivos de la investigación, centrada en la disposición de la PEA hacia la adquisición de vehículos eléctricos.

Además, se optó por incluir en la muestra a individuos con un nivel educativo superior, ya que se consideró que su percepción sobre la adopción de vehículos eléctricos podría proporcionar perspectivas adicionales, especialmente en relación con sus ingresos y su disposición a invertir en tecnologías sostenibles. Por lo tanto, el diseño de la encuesta se centró en obtener datos significativos sobre la disposición a adquirir vehículos eléctricos en función a los ingresos de la población objetivo.

En la Tabla 1 se presenta la lista de operacionalización utilizada para la ejecución de la encuesta. Esta tabla se diseñó con el objetivo de definir claramente las variables de estudio, así como sus respectivos indicadores, facilitando así la recolección y análisis de datos.

### 2.3. ANÁLISIS DE DATOS

Los datos recopilados fueron sometidos a un análisis exhaustivo utilizando herramientas estadísticas y de visualización. Para ello, se empleó la plataforma PowerBI, que permitió generar gráficos de barras, gráficos de pastel, gráficos lineales y otras representaciones visuales para explorar y comprender mejor los patrones y tendencias presentes en los datos.

Se realizaron gráficos de barras para visualizar la distribución de las respuestas en función de diferentes variables, como el nivel de ingresos, conocimiento de los vehículos eléctricos, la disposición a adquirir un vehículo eléctrico, entre otros. Los gráficos de pastel se utilizaron para destacar las preferencias y proporciones relativas en cada categoría.

Además, se emplearon gráficos lineales para identificar cambios de preferencia relacionados con esta tecnología.

El análisis detallado de estos datos permitió identificar patrones significativos y correlaciones entre las diferentes

**Tabla 1.**

Diseño de tabla de operacionalización para encuesta.

Variable	Indicador	Operacionalización para encuesta
Adopción masiva de vehículos eléctricos	1. Conciencia del consumidor	1.1 ¿Cuál es su nivel de conocimiento sobre vehículos eléctricos? (Escala de 1 al 5, donde 1 es poco conocimiento y 5 es mucho conocimiento)
		1.2 ¿Qué tan importante considera los beneficios ambientales y económicos de los vehículos eléctricos en su decisión de compra? (Escala de 1 a 5)
Estrategias de negocio para adopción	2. Disponibilidad de infraestructura de carga	2.1 ¿Cómo calificaría la accesibilidad y facilidad de uso de las estaciones de carga? (Escala de 1 a 5)
	1. Políticas gubernamentales e incentivos financieros	1.1 ¿Está al tanto de las políticas gubernamentales de apoyo a la movilidad sostenible en Guayaquil? (Sí/No)
2. Estrategias de marketing y comunicación		1.2 ¿Qué tan influyentes considera los incentivos financieros en su decisión de comprar un vehículo eléctrico (subsidios y subvenciones gubernamentales)?
	Contexto geográfico ciudad de Guayaquil	1. Infraestructura vial y tráfico
2.2 ¿Qué tan efectivas cree que son las estrategias de comunicación para promover la adopción de vehículos eléctricos? (Escala de 1 a 5)		
	2. Percepción Ambiental Sostenibilidad	1.1 ¿Cómo calificaría la calidad de la infraestructura vial urbana en Guayaquil en relación con la movilidad sostenible? (Escala de 1 a 5)
		1.2 ¿Cómo cree que el tráfico y la congestión vehicular afectan a la movilidad sostenible en Guayaquil?
		2.1 ¿Considera importante la sostenibilidad ambiental al elegir un medio de transporte? (Sí/No)
		2.2 ¿Qué tan dispuesto estaría a adoptar un vehículo eléctrico en función de su contribución a la sostenibilidad?

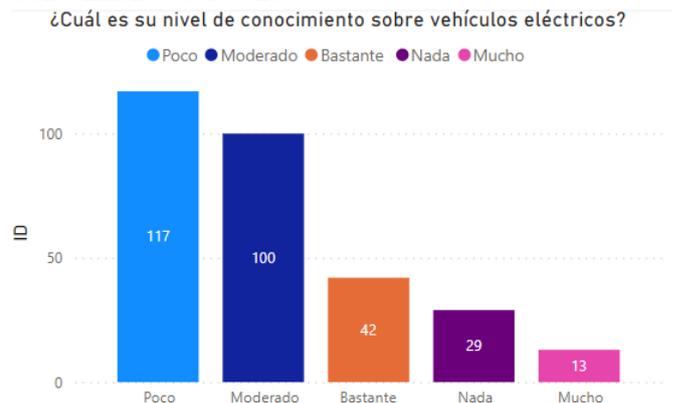
variables estudiadas, proporcionando una visión integral de las preferencias de la población económicamente activa de Guayaquil hacia los vehículos eléctricos.

A continuación, se detallan los datos obtenidos en la encuesta.

Como se muestra en la figura 1, la mayor parte de la población indicó que tienen poco conocimiento sobre los vehículos eléctricos. Y a pesar de la escasa familiarización con los vehículos eléctricos, los encuestados tienen una gran conciencia ambiental al momento de elegir un medio de movilización como se detalla en la figura 2.

**Figura 1.**

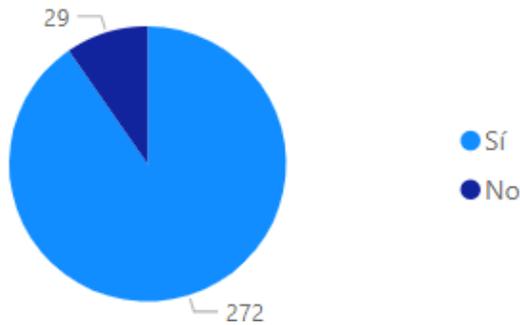
Conocimiento sobre VEs.



**Figura 2.**

Importancia de sostenibilidad para el usuario.

**¿Considera importante la sostenibilidad ambiental al elegir un medio de transporte?**

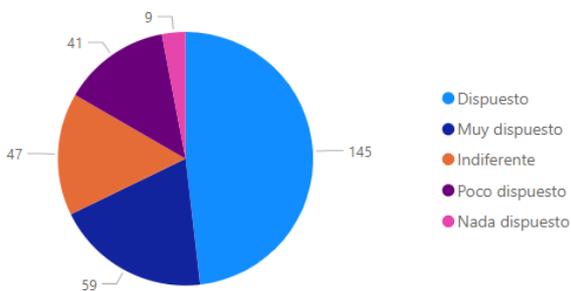


Según los datos obtenidos en la figura 2, un destacado 90.37% de la población encuestada considera crucial la sostenibilidad ambiental al seleccionar un medio de transporte. Por otro lado, un 9.63% de la población mostró una menor preocupación por la sostenibilidad ambiental al momento de tomar decisiones de transporte. Lo que genera una gran apertura para la transición hacia la movilidad sostenible en la ciudad de Guayaquil.

**Figura 3.**

Disposición de adopción de VEs. en función de su contribución a la sostenibilidad.

**¿Qué tan dispuesto estaría a adoptar un vehículo eléctrico en función de su contribución a la sostenibilidad?**



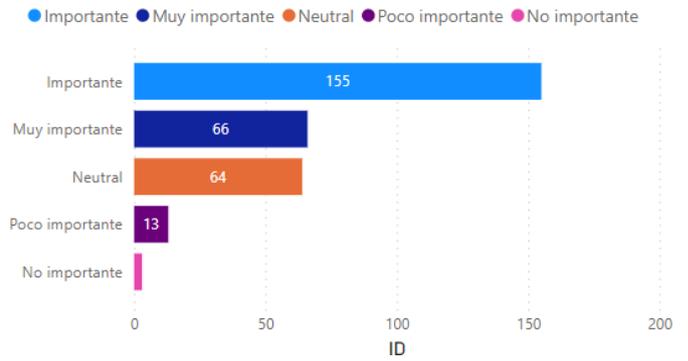
En la figura 3, se detalla la cantidad de personas que están dispuestas a adoptar un vehículo eléctrico en función a su contribución a la sostenibilidad. El 48.17% de la población seleccionó que estarían dispuestos a la adopción de un vehículo eléctrico, el 19.60% estarían muy dispuestos, el 15.61% indicaron que les parece indiferente, el 13.62% estarían poco dispuestos, dando como resultado que el 2.99% no estaría nada dispuesto.

De acuerdo con los datos presentados en la figura 4, se observa que la mayoría de los encuestados consideran importantes tanto los beneficios ambientales como los económicos asociados a los vehículos eléctricos al tomar decisiones de compra. En detalle, de las 301 personas encuestadas, el 51.5% consideran estos beneficios importantes, 21.93% los consideran muy importantes, 21.26% se mostraron neutrales, 4.32% los ven como poco importantes y el resto no los consideran importantes.

**Figura 4.**

Importancia de los beneficios ambientales y económicos de los VEs. a la hora de la compra.

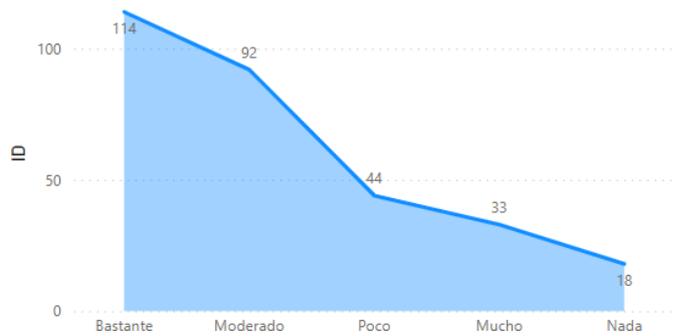
**¿Qué tan importante considera los beneficios ambientales y económicos de los vehículos eléctricos en su decisión de compra?**



**Figura 5.**

Impacto de incentivos financieros en la decisión de compra de VEs: subsidios y subvenciones.

**¿Qué tan influyentes considera los incentivos financieros en su decisión de comprar un vehículo eléctrico (Subsidios y Subvenciones)?**



Asimismo, el análisis de la figura 5 revela que una cantidad significativa de la población encuestada, representada por 114 individuos (37.87%), considera los incentivos financieros como un factor influyente en su decisión de adquirir un vehículo eléctrico. Estos incentivos, que incluyen subsidios y subvenciones, parecen jugar un papel crucial en la motivación de los consumidores hacia la compra de vehículos eléctricos.

La disposición a adoptar un vehículo eléctrico se analizó según los ingresos mensuales de 301 encuestados. Entre los que ganan más de USD 1.000 mensuales, 60 personas están dispuestas y 29 muy dispuestas a comprar un vehículo eléctrico. En comparación, entre los que ganan entre 0 y USD 500, 29 personas están dispuestas y 8 muy dispuestas. Estos datos sugieren que, aunque hay interés en todos los niveles de ingresos, la mayor disposición se encuentra en los grupos con ingresos más altos, indicando que la capacidad económica influye en la decisión de compra.

La evaluación de la accesibilidad y facilidad de uso de las estaciones de carga revela una distribución variada de opiniones entre los encuestados de la población PEA, quienes compartieron sus criterios y experiencias. Un 44.19% se mostró neutral, mientras que un 30.9% consideró que la accesibilidad es muy difícil. Por otro lado, un 11.96% indicó que las estaciones de carga les resultan fáciles de usar, y un 10.3% las calificó como difíciles, pero manejables. Además, un pequeño porcentaje del 2.66% de la población señaló que las estaciones de carga les resultan muy fáciles de utilizar. Es notable destacar que, a pesar de las dificultades percibidas, estos hallazgos no disuaden a los usuarios de considerar la compra de vehículos eléctricos, lo que refuerza su compromiso con la sostenibilidad ambiental.

De igual manera, en la figura 8 la evaluación de la calidad de la infraestructura vial urbana en Guayaquil en relación con la movilidad sostenible revela una perspectiva diversa entre los encuestados. La mayoría, representada por 121 personas, la califica como regular, seguida de 104 personas que la consideran como mala y 36 personas que la perciben como muy mala. Por otro lado, 35 personas la clasifican como buena y solo 5 personas la consideran como muy buena.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La transición hacia vehículos eléctricos (VE) es crucial para reducir emisiones y promover la sostenibilidad en Guayaquil. Este capítulo presenta estrategias empresariales basadas en datos de encuestas que destacan la necesidad de mejorar la infraestructura de carga, aumentar la educación y concientización, y fomentar programas de prueba y demostración.

#### 3.1. DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE CARGA

Considerando que un 30.9% de los encuestados perciben dificultades en la accesibilidad de las estaciones de carga, es crucial enfocarse en mejorar esta infraestructura. Esto implica la implementación de nuevas estaciones de carga en áreas identificadas con alta demanda y poca disponibilidad, así como la optimización de las existentes.

Se sugiere la instalación de tecnología de carga rápida y la actualización de los sistemas de pago para hacerlos más convenientes. Además, dado que un 10.3% las calificó como difíciles, pero manejables, estas mejoras deben garantizar una infraestructura de carga robusta y eficiente que satisfaga las necesidades de los propietarios de vehículos eléctricos en la ciudad.

#### 3.2. EDUCACIÓN Y CONCIENTIZACIÓN

Un 44.19% de la población se muestra neutral respecto a la accesibilidad de las estaciones de carga, y un 35.22% considera regular la efectividad de las estrategias de comunicación para promover la adopción de vehículos eléctricos. Con un 67.44% de la población que no recuerda ninguna campaña de marketing específica, es fundamental lanzar campañas educativas para aumentar la conciencia sobre los beneficios de los vehículos eléctricos. Estas campañas deben destacar ahorros en costos de combustible y mantenimiento, reducción de emisiones contaminantes y contribución a la sostenibilidad ambiental, utilizando medios tradicionales, redes sociales y eventos comunitarios para llegar a un amplio espectro de usuarios. Considerando que un 90.37% de los encuestados considera importante la sostenibilidad ambiental, a pesar de que solo el 38.87% tiene un conocimiento escaso de vehículos eléctricos, estas campañas educativas son esenciales. Además, un 51.5% de los encuestados considera importantes los beneficios ambientales y económicos de los vehículos eléctricos en su decisión de compra, y un 21.93% los considera muy importantes. Este enfoque debe destacarse en las estrategias de comunicación y marketing para incentivar la compra de vehículos eléctricos.

#### 3.3. PROGRAMAS DE PRUEBA Y DEMOSTRACIÓN

Considerando que un 10.3% de los encuestados encuentran las estaciones de carga difíciles, pero manejables y un 28.57% considera mala la efectividad de las estrategias de comunicación, es esencial implementar programas que permitan a los consumidores experimentar directamente la conducción de vehículos eléctricos. Estos programas podrían incluir períodos de prueba gratuitos o con descuento, eventos de demostración en concesionarios y oportunidades para alquilar vehículos eléctricos a corto plazo. Esto ayudará a superar las barreras iniciales de percepción y experiencia. Además, dado que un 48.17% de los encuestados están dispuestos y un 19.6% muy dispuestos a adoptar un vehículo eléctrico en función de su contribución a la sostenibilidad, estos programas de prueba pueden ser un factor decisivo para aumentar la adopción.

#### 3.4. ALIANZAS ESTRATÉGICAS:

Dado que un pequeño porcentaje (2.66%) de la población encuentra muy fácil de utilizar las estaciones de

carga y un 17.61% considera buenas las estrategias de comunicación, se sugiere establecer alianzas estratégicas con fabricantes de vehículos eléctricos, proveedores de energía y empresas de tecnología. Estas alianzas pueden facilitar programas de financiamiento conjunto, desarrollo de soluciones de carga innovadoras y promoción conjunta de eventos relacionados con la movilidad sostenible. También es importante considerar que un 37.87% de los encuestados considera los incentivos financieros, como subsidios y subvenciones gubernamentales, como un factor influyente en su decisión de adquirir un vehículo eléctrico.

#### 3.4. DESARROLLO DE ECOSISTEMAS DE SERVICIOS:

Considerando que un 11.96% de los encuestados encuentran fácil de utilizar las estaciones de carga y un 8.31% califica como muy buenas las estrategias de comunicación, es importante desarrollar ecosistemas de servicios integrales que acompañen la experiencia de propiedad de un vehículo eléctrico. Esto podría incluir servicios de mantenimiento especializados, programas de asistencia en carretera dedicados, opciones de seguro específicas y aplicaciones móviles que proporcionen información en tiempo real sobre la carga y el rendimiento del vehículo. Mejorar la infraestructura vial también es esencial, ya que un 40.2% de los encuestados califica la calidad de la infraestructura vial urbana como regular, y un 34.55% la considera mala, lo que afecta la movilidad sostenible en la ciudad.

## 4. CONCLUSIONES

El análisis de la transición hacia la movilidad sostenible mediante la adopción masiva de vehículos eléctricos (VE) en la ciudad de Guayaquil, apoyado en diversas estrategias de negocio, proporciona conclusiones críticas que resaltan la necesidad de acciones integradas y estratégicas para superar las barreras actuales y promover una adopción efectiva.

#### 4.1. MEJORA CRÍTICA DE LA INFRAESTRUCTURA DE CARGA

La accesibilidad limitada a las estaciones de carga sigue siendo una barrera significativa. Con un 30.9% de los encuestados encontrando difícil el uso de estas estaciones, es imperativo implementar y optimizar infraestructuras de carga robustas y accesibles. La instalación de tecnología de carga rápida y la modernización de sistemas de pago se destacan como acciones esenciales para facilitar esta transición.

#### 4.2. Relevancia de la educación y concientización

La falta de conocimiento sobre los VE es una barrera notable, con un 67.44% de los encuestados sin recordar

campañas de marketing específicas. Sin embargo, la alta valoración de la sostenibilidad ambiental (90.37%) y los beneficios económicos y ambientales (51.5% importantes, 21.93% muy importantes) subrayan la necesidad de campañas educativas intensivas. Estas campañas deben enfocarse en destacar los ahorros en costos y los beneficios ambientales de los VE, para influir positivamente en la percepción y adopción.

#### 4.3. EFECTIVIDAD DE PROGRAMAS DE PRUEBA Y DEMOSTRACIÓN

La implementación de programas que permitan a los consumidores experimentar directamente los VE es fundamental para superar las barreras iniciales de percepción. Con un 48.17% de los encuestados dispuestos y un 19.6% muy dispuestos a adoptar un VE por su contribución a la sostenibilidad, estos programas pueden ser cruciales para fomentar una mayor adopción.

#### 4.4. IMPORTANCIA DE LAS ALIANZAS ESTRATÉGICAS

Establecer alianzas con fabricantes de VE, proveedores de energía y empresas de tecnología es vital para crear un ecosistema de apoyo integral. Estas colaboraciones pueden facilitar el desarrollo de soluciones innovadoras de carga y programas de financiamiento conjunto, además de la promoción de eventos relacionados con la movilidad sostenible. Los incentivos financieros, considerados influyentes por el 37.87% de los encuestados, deben ser integrados en estas estrategias para reducir las barreras económicas.

#### 4.5. DESARROLLO DE ECOSISTEMAS DE SERVICIOS DE APOYO:

Ofrecer servicios adicionales que mejoren la experiencia de los propietarios de VE es crucial. Esto incluye servicios de mantenimiento especializados, asistencia en carretera, seguros específicos y aplicaciones móviles informativas. Además, la calidad de la infraestructura vial debe ser mejorada, ya que un 40.2% de los encuestados la califica como regular y un 34.55% como mala, lo que afecta la percepción general de la movilidad sostenible.

Con relación a lo expuesto, para la transición hacia una movilidad sostenible en Guayaquil mediante la adopción masiva de vehículos eléctricos requiere una combinación de mejoras en la infraestructura de carga, campañas educativas efectivas, programas de prueba, alianzas estratégicas y el desarrollo de servicios de apoyo. Estas estrategias, alineadas con las percepciones y necesidades de la población, son esenciales para superar las barreras actuales y promover un entorno favorable para la adopción de VE, contribuyendo así a un futuro más limpio y sostenible para la ciudad.

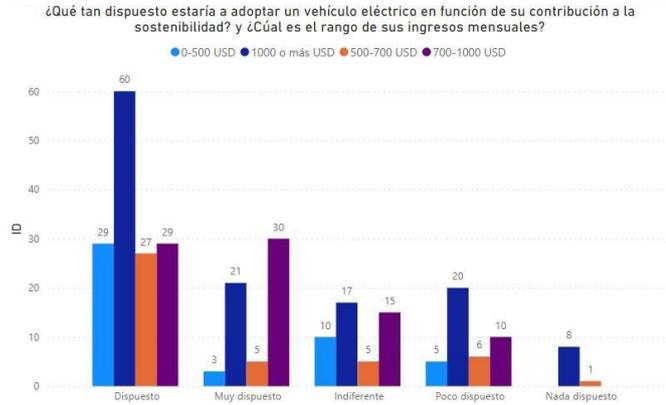
## REFERENCIAS

- [1] M. Gallo and M. Marinelli, "Sustainable mobility: A review of possible actions and policies", Sep. 01, 2020, *MDPI*. doi: 10.3390/su12187499.
- [2] E. Holden, D. Banister, S. Gössling, G. Gilpin, and K. Linnerud, "Grand Narratives for sustainable mobility: A conceptual review", Jul. 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.erss.2020.101454.
- [3] J. P. Ayala Taco and A. Ibarra, "Trolebús eléctrico, una primera solución a la movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito-Ecuador", *TRIM. Tordesillas, revista de investigación multidisciplinar*, vol. 17, no. 17, pp. 81-92, 2020, doi: 10.24197/trim.17.2019.81-92.
- [4] "EN."
- [5] C. F. Guerrero Dumas, C. Maldonado Noboa, D. K. Reyes Rodas, and M. Ávila Calle, "Propuesta, indicadores de movilidad sostenible para la ciudad de Cuenca, Ecuador", *Conciencia Digital*, vol. 5, no. 1.2, pp. 46-65, 2022, doi: 10.33262/concienciadigital.v5i1.2.2085.
- [5] L. A. Guzman, J. Arellana, and V. Álvarez, "Confronting congestion in urban areas: Developing Sustainable Mobility Plans for public and private organizations in Bogotá", *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 134, no. February, pp. 321-335, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.02.019.
- [7] Parra Rocío, "La Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible: antecedentes y perspectivas para promover el consumo y la producción sostenibles en Chile", *Revista de Derecho Ambiental*, vol. VI, no. 10, pp. 99-121, 2018, [Online]. Available: <http://www.derecho.uchile.cl/cda>
- [8] H. Gudmundsson, R. P. Hall, G. Marsden, and J. Zietsman, *Springer Texts in Business and Economics Sustainable Transportation*. 2016.
- [9] H. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-Seppä, and M. Airaksinen, "What are the differences between sustainable and smart cities?", *Cities*, vol. 60, pp. 234-245, 2017, doi: 10.1016/j.cities.2016.09.009.
- [10] D. Delgado, S. Quiroz, and G. Casanova, *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2021)*, vol. 2, no. I CoWEFS 2021. Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-75315-3.
- [11] Plan de movilidad urbana y espacios públicos sostenibles. Caso de estudio Bahía de Caráquez, *Plan de Movilidad Urbana*, no. October. 2020. [Online]. Available: <http://www.zaruma.gob.ec/>
- [12] A. A. T. I, "Urban traffic order proposal of Pedernales canton Proposta de ordenamento do tráfego urbano do cantão de Pedernales," vol. 9, pp. 1206-1226, 2023.
- [13] K. Abata, F. Artega, and Daniel Delgado, "Analysis of Vehicle Congestion At Different Intersections in the City of Portoviejo, Ecuador", 2022.
- [14] Atracción de inversiones y generación de empleo. Ley para el fomento productivo, "Asamblea Nacional", *Registro Oficial*, pp. 1- 49, 2018, [Online]. Available: <https://www.registroficial.gob.ec/index.php/registro-oficial-web/publicaciones/suplementos/item/10838-suplemento-al-registro-oficial-no-309.html>
- [15] Asamblea Nacional, "Suplemento Ley Orgánica de Eficiencia Energética", *Administración constitucional del Ecuador*, pp. 1-8, 2019.
- [16] Consultores Tributarios Ecuatorianos, "Boletín informativo 001-2024 Ley Orgánica de Competitividad Energética", Quito, 2024.
- [17] Comité de Comercio Exterior, "Resolución Nro. 016-2019. Reducción arancelaria a vehículos eléctricos, baterías y cargadores", 2019.
- [18] AEADE, "Boletín de Ventas", *Aeade*, 2023.
- [19] BYD, "BYD entrega a Guayaquil la electrolinera más grande de Ecuador". [Online]. Available: <https://bydelectrico.com/ec/2019/11/08/byd-entrega-a-guayaquil-la-electrolinera-mas-grande-de-ecuador/>
- [20] BYD, "Guayaquil entra de lleno a la movilidad eléctrica con incentivos a los transportistas y nueva flota de buses eléctricos BYD". [Online]. Available: <https://bydelectrico.com/ec/2019/03/13/guayaquil-entra-de-lleno-a-la-movilidad-electrica-con-incentivos-a-los-transportistas-y-nueva-flota-de-buses-electricos-byd/>
- [21] C.F.N.CFN), "Financiamiento de primeros buses eléctricos en Ecuador", Financia primeros buses eléctricos en Ecuador. [Online]. Available: <https://www.cfn.fin.ec/cfn-financia-primeros-buses-electricos-en-ecuador/>
- [22] ANETA, "Responsabilidad Social Corporativa: Políticas Ambientales." [Online]. Available: <https://aneta.org.ec/responsabilidad/>

**ANEXOS**

**Figura 6.**

Interés de compra de VEs de acuerdo con el rango de ingresos mensuales del usuario.



**Figura 7.**

Evaluación de accesibilidad y usabilidad de las estaciones de carga de VEs.



**Figura 8.**

Evaluación de calidad de la infraestructura vial urbana en Guayaquil y su impacto en la movilidad sostenible.

¿Cómo calificaría la calidad de la infraestructura vial urbana en Guayaquil en relación con la movilidad sostenible?



Extensión del documento hasta 10.000 palabras incluidas las referencias

## **TÍTULO DEL ARTÍCULO; TIMES NEW ROMAN; TAMAÑO-14 (CADA PALABRA CON MAYÚSCULA)**

Título del artículo en inglés; Times New Roman; Tamaño-11

Estilo y estructura de los encabezados. (solo hasta 4 niveles y 3 subniveles)

### **TÍTULO**

### **RESUMEN / ABSTRACT**

El resumen describirá de forma concisa siguiendo un orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.

### **PALABRAS CLAVE / KEY WORDS**

Se deben exponer máximo 5 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.

*Ejemplo:*

*Palabras clave: X1, X2, X3, X4*

### **Texto principal**

Times New Roman, Microsoft Word, 12 pts.

#### **1. Introducción**

Éste debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatura más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.

#### **2. Método**

Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

##### **2.1 Material**

##### **2.2 Configuración**

##### **2.2.1 Experimento**

#### **3. Resultados y discusión**

Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.

### 3.1 Efecto de la temperatura

### 3.2 Efecto de la velocidad superficial

## 4. Conclusión

### Referencias

Se sugiere trabajar con gestor de referencia como Mendeley [Video Guía](#)

Las referencias se enumerarán por orden de citación en el texto (IEEE).

[1] -----.

[2] -----.

[3] -----.

En el texto, por favor cite cada referencia por número como se muestra a continuación: *Este resultado puede atribuirse a la diferencia de las dos velocidades de reacción según lo informado por Suzana et al. [1]*

*Este resultado puede atribuirse a la diferencia de las dos velocidades de reacción como se informó previamente [1].*

El estilo dependerá del tipo de referencia que se muestra a continuación. Pero no es necesario clasificarlo en los tipos. Simplemente, enumérelos por orden de citación en el texto.

*Ejemplos:*

### Artículos

[1] J. Riess, J. J. Abbas, “Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation”. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/7333.94846>

### Conferencias

[1] Suzana Y, Mohamad T A, Uemura Y, Anita R, Lukman I, Shuit S H, Tan K T, Lee K T. Revisión sobre la utilización de la biomasa agrícola como fuente de energía en Malasia. En: Actas del 16° Simposio regional de la ASEAN sobre ingeniería química, 1 y 2 de diciembre de 2009, Manila, Filipinas, págs. 86-89.

[1] MPOB (Junta de Aceite de Palma de Malasia), 2008, “6.8 Productores principales mundiales de aceite de palma: 1999 - 2008.” Recuperado el 28 de enero de 2010 de [http://econ.mpob.gov.my/economy/annual/stat2008/ei\\_world08.htm](http://econ.mpob.gov.my/economy/annual/stat2008/ei_world08.htm). (Citar correctamente la información de la fuente se verificará en los buscadores especializados de contenido)

### Libro

[1] Corley R. V, Tinker P B. La palma aceitera. 4ta ed. Oxford: Blackwell Science; 2003, p.328.

### Tablas

Las tablas son un recurso para facilitar al lector la comprensión de los datos que se van a contrastar. Se considera una tabla aquella que está compuesta por filas y columnas y que contiene información numérica o textual.

Comprende de: número, título descriptivo, contenido y nota. Deben mencionarse de forma explícita en el texto para dar lugar a su inserción (en la página o en un apartado al final del documento) y deben atribuirse los créditos de autoría en los casos en que se retome información de otras fuentes, de forma literal o adaptada.

Etiqueta y número de la tabla en negrita

**Tabla 1**

Título descriptivo de la tabla en cursiva

*Violencia de género en Cali en los años 2017, 2018 y 2019*

Tipo de violencia	Año	
	2018	2019
Doméstica	127	130
Patrimonial y económica	124	90
Psicológica	119	110
Laboral	120	102
Sexual	124	113
Total de casos	614	545

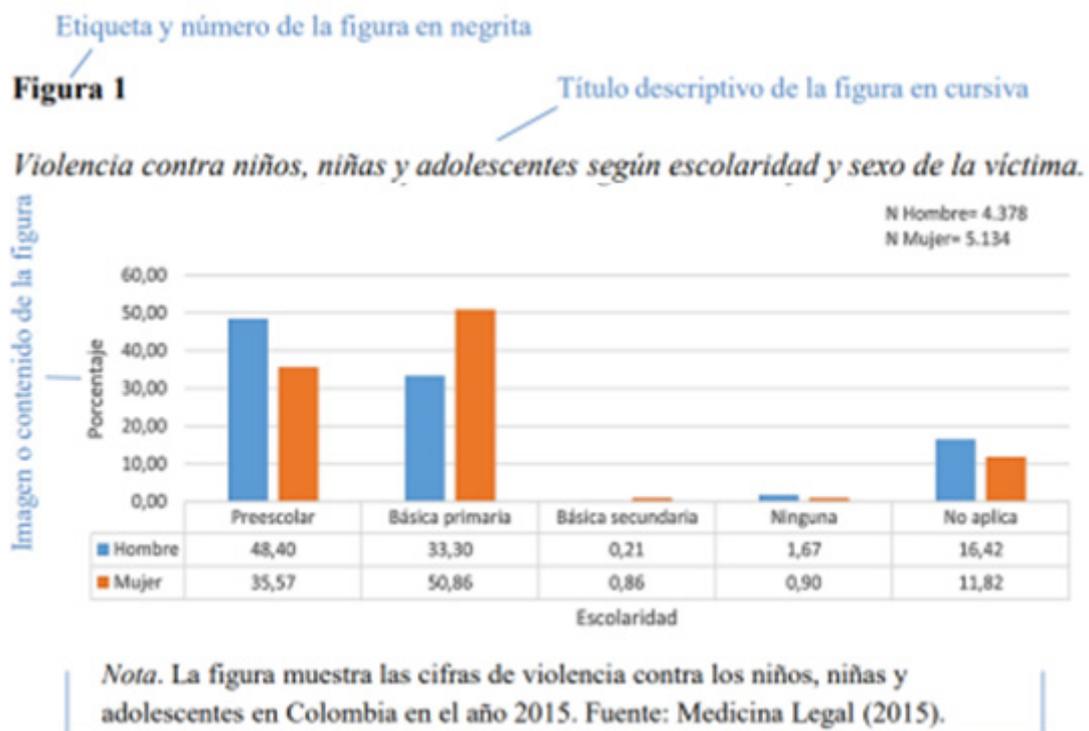
Contenido de la tabla (se marcan las líneas horizontales). Puede tener interlineado 1.0, 1.5 o 2.0

*Nota. Datos tomados del Observatorio de Género de Cali (2020).*

Nota de la tabla con descripciones adicionales y atribución de autoría. Debe conservar el tamaño y tipo de letra del documento en general. Si se presentan varias notas, se sugiere empezar con notas generales, luego específicas y luego de probabilidad.

### Formato de figuras

Las figuras son todos aquellos tipos de gráficos que no se consideren tablas. Una figura puede ser un cuadro, fotografía, dibujo, imágenes clínicas o cualquier ilustración o representación no textual. Como su componente visual tiene un gran peso en la comunicación, se debe cuidar la calidad de la imagen, su organización y color. Sus contenidos pueden tener un tamaño de letra sin serifa (Calibri, Arial, Lucida Sans Unicode) que puede ir desde los 8 hasta los 14 puntos.



Nota de la figura con descripciones adicionales y atribución de autoría. Las notas deben conservar el tamaño y tipo de letra del documento en general. Si se presentan varias notas, se sugiere empezar con notas generales, luego específicas y luego de probabilidad.



Esta revista, usó tipografía Minion Pro tamaño 11, se terminó de diagramar en Editorial Universitaria en el mes de diciembre de 2024 siendo rector de la Universidad Central del Ecuador el Dr. Patricio Espinosa del Pozo, Ph. D. y Director de la Editorial Universitaria el MSc. Edison Benavides.

